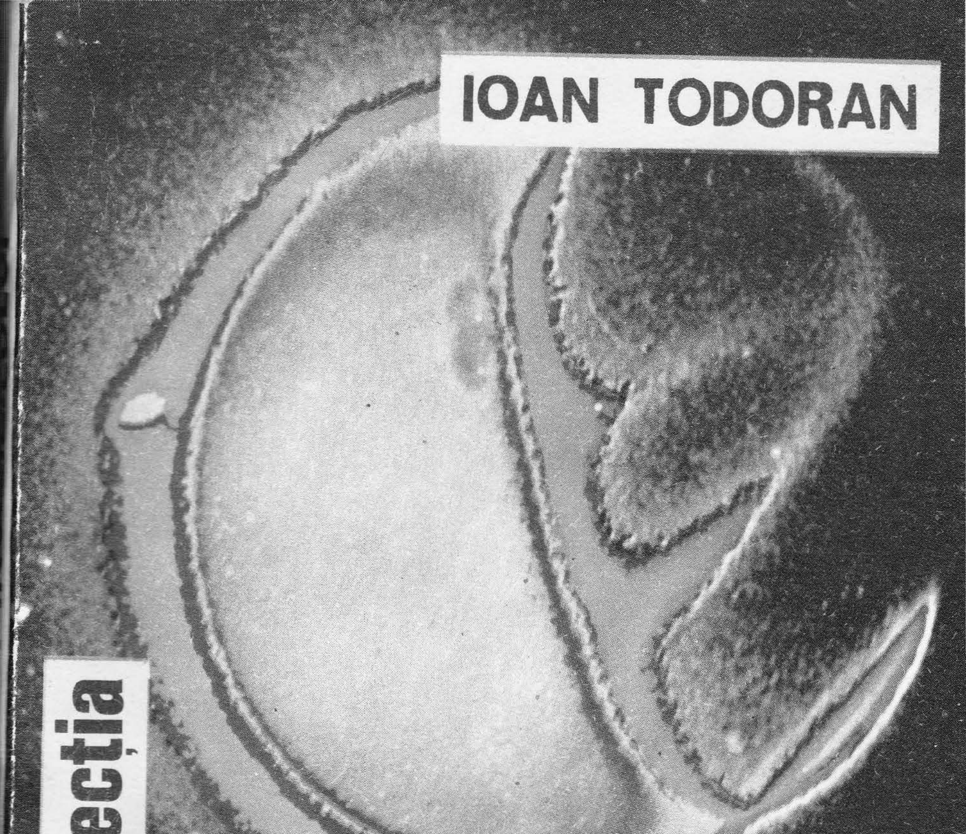
IOAN TODORAN



colecția cristal

ASTRONOMIA INVIZIBILULUI

EDITURA ALBATROS

PREFAȚA

Trăind și muncind sub influența binefăcătoare a razelor Soarelui, omul și-a adaptat și sensibilizat ochiul la radiațiile emise de astrul zilei, radiații care pătrund prin atmosfera terestră și ale căror lungimi de undă ocupă un domeniu foarte restrîns din spectrul electromagnetic. Este vorba de domeniul spectral vizibil (optic). Acesta este motivul pentru care, pînă la mijlocul secolului nostru, toate cunoștințele despre corpurile cerești ne-au fost furnizate de astronomia optică sau astronomia vizibilului.

Pînă la mijlocul secolului nostru, toate radiațiile emise de corpurile cerești pe alte lungimi de undă, care se găsesc de o parte și de alta a domeniului vizual (optic), rămîneau inaccesibile observatorului terestru. Iată de ce este firesc să ne întrebăm: „Oare ce se găsește acolo unde nimic nu se vede ?", „Ce enigme ascunde bolta cerească dincolo de puterea de pătrundere a unui uriaș telescop terestru ?".

Au apărut, așadar, primele idei despre lumea „inaccesibilă" observațiilor optice, idei care, pînă la urmă, au dus la apariția și dezvoltarea astronomiei în domeniile spectrale diferite de cel vizibil. A apărut astfel astronomia invizibilului.

Baza materială, pentru această nouă și importantă ramură a astronomiei, este asigurată prin construirea unor radiotelescoape amplasate pe suprafața Pămîntului, precum și prin receptoarele speciale amplasate la bordul unor baloane, rachete sau sateliți artificiali ai planetei noastre. Acestea din urmă pot ridica receptoarele respective la altitudini mari, dincolo de

păturile dense ale atmosferei terestre, fapt care face posibilă recepționarea radiațiilor din întregul spectru electromagnetic. Astfel au fost create condițiile tehnice pentru apariția și dezvoltarea astronomiei invizibilului care, prin rezultatele obținute, a uimit și pe cei mai sceptici cugetători.

Despre unele rezultate obținute de astronomia invizibilului va fi vorba în paginile care urmează și pe care le dedic tuturor acelora care se interesează de cerul inaccesibil vederii noastre de pe Pămînt.

AUTORUL

Capitolul 1

BOLTA CEREASCĂ — APARENȚĂ ȘI REALITATE

Într-o seară senină și fără lună, bolta cerească dă impresia că stelele s-ar afla într-un număr infinit de mare și cu străluciri diferite. Dar, după o privire mai atentă, observatorul se convinge cu ușurință de faptul că numărul de stele care se pot vedea cu ochiul liber nu este chiar foarte mare. Un observator cu vedere bună ar putea număra vreo 6 000 de stele vizibile pe întreaga boltă cerească, cîte 3 000 pe fiecare emisferă.

Cu un binoclu obișnuit se pot observa circa 60 000 de stele, cu un telescop nu prea mare se văd peste 200 000 de stele etc.

1.1. Strălucirea și luminozitatea stelelor

După cum se știe, legătura dintre stele și observatorul terestru este realizată prin intermediul radiațiilor electromagnetice. De aceea, datele nemijlocite de observații sînt *strălucirile aparente*; ele reprezintă cantitatea de energie recepționată pe unitatea de timp și pe unitatea de arie receptoare orientată perpendicular pe direcția astrului.

Prin intermediul unei scale logaritmice, strălucirile sînt exprimate în așa-numitele *magnitudini aparente*. În acest scop, în anul 1855 N. R. Pogson (1829—1891) stabilește relația

$$\log_{10} \frac{I_m}{I_{m'}} = -0{,}4\,(m - m') \qquad (1.1)$$

unde I și m reprezintă strălucirea și respectiv magnitudinea aparentă.

Cu ochiul liber se pot observa stele pînă la magnitudinea 6, cu un binoclu obișnuit se ajunge pînă la magnitudinea 8, iar puterea de pătrundere a unui telescop depinde de diametrul

oglinzii principale, cele mai slabe stele observabile în zilele noastre avînd magnitudinile aparente cuprinse între 23 și 24.

Stelele se prezintă cu străluciri diferite atît din cauza unor proprietăți fizice ale acestora, cît și din cauza distanțelor diferite la care se găsesc în raport cu observatorul. Prin urmare, magnitudinile aparente singure nu furnizează prea multe informații despre natura fizică a corpurilor cerești. De aceea, pentru a ușura compararea proprietăților fizice ale stelelor, s-a introdus așa-numita *magnitudine absolută*, M, care este egală cu magnitudinea aparentă a aceleiași stele dacă ea s-ar afla la distanța de 10 parseci [1].

Între magnitudinea aparentă, m, magnitudinea absolută, M, și paralaxa anuală a stelei există relația

$$M = m + 5 + 5 \log p'' = m + 5 - 5 \log d \qquad (1.2)$$

unde p'' este paralaxa exprimată în secunde de arc, iar d reprezintă distanța în parseci.

Din observații se dispune de magnitudinea aparentă și distanță, iar formula (1.2) ne conduce la magnitudinea absolută, aceasta din urmă fiind necesară pentru a stabili legătura dintre strălucire și luminozitate.

Se numește luminozitate, L, cantitatea de energie emisă de o stea în unitatea de timp.

Între magnitudinea absolută și luminozitate s-a stabilit relația

$$\log_{10} \frac{L}{L_{\odot}} = -0{,}4\,(M - M_{\odot}) \qquad (1.3)$$

unde semnul $\odot$ este simbolul Soarelui ($L_{\odot} = 3{,}90 \cdot 10^{33}$ erg/s, $M_{\odot} = +4{,}71$) [2].

Deoarece corpurile cerești sînt situate la mari depărtări față de noi, ele apar ca fiind situate toate la aceeași distanță

---

[1] 1 parsec = 1 pc — distanța unui obiect care are paralaxa de o secundă de arc ($p = 1''$). Un parsec = 3,26 ani lumină, 1 000 pc = 1 kpc, 10^6 pc = 1 Mpc.

[2] Erg — unitate de măsură (tolerată) pentru energie, lucru mecanic și căldură, egală cu lucrul mecanic efectuat de o forță de o dină (1 dyn = 10^{-5} N) care își deplasează punctul de aplicație cu un centimetru. Are valoarea de 10^{-7} jouli.

și dau imaginea aparentă a unei bolți pe care se proiectează obiectele respective. Este vorba de *sfera cerească* al cărei centru este situat în ochiul observatorului. Pentru scopuri practice centrul acestei sfere poate fi localizat în centrul Pămîntului.

La prima vedere, bolta cerească ne apare ca un cîmp dezordonat, presărat cu puncte luminoase. Dar după o privire mai atentă, în acest cîmp se pot distinge grupe în care stelele par a fi legate între ele.

Dacă stelele unei anumite grupe le unim prin linii (imaginare), se formează figuri care se pot asemăna cu ființe umane, animale sau alte imagini pe care le are omul din natura înconjurătoare. Aceste grupe de stele, care poartă numele de *constelații*, sînt cunoscute din timpuri străvechi.

La Adunarea Generală a Uniunii Astronomice Internaționale, din anul 1925, s-a stabilit ca întreaga boltă cerească să fie împărțită în 88 constelații. Tot atunci s-au stabilit și limitele fiecărei constelații, denumirile utilizate fiind cele din limba latină : Ursa Major (Ursa Mare = Carul Mare), Leo (Leul), Taurus (Taurul) etc.

Stelele dintr-o constelație sînt notate cu literele alfabetului grec, în ordinea descreșterii strălucirii. Astfel, steaua cea mai luminoasă din Ursa Major este notată cu α și, utilizînd genitivul din limba latină, spunem steaua α Ursae Majoris (= steaua α din Ursa Mare). Apoi vine, în ordinea descreșterii strălucirii, β Ursae Majoris etc. După epuizarea tuturor literelor alfabetului grec, pentru celelalte stele se folosesc literele alfabetului latin, iar dacă nici acestea nu sînt suficiente, mai departe se utilizează cifrele arabe.

La o privire mai îndelungată a bolții cerești, observatorul constată că aceasta se prezintă cu aspecte diferite la momente diferite în cursul unei nopți sau la epoci diferite din cursul anului. Astfel, de exemplu, în cursul unei nopți putem constata că stelele care, la începutul serii, erau la orizontul estic „se urcă" pe bolta cerească spe culminația superioară (înălțimea maximă deasupra orizontului) și, apoi, „trec" spre orizontul vestic unde apun. Această mișcare aparentă este o consecință a mișcării de rotație axială a Pămîntului de la vest spre est.

Mișcarea aparentă a bolții cerești se numește *mișcare diurnă*, ea se efectuează în decursul a 23 ore, 56 min, timp

în care stelele „descriu" cercuri cu centrele situate pe dreapta care coincide cu axa de rotație a Pămîntului.

Dacă urmărim bolta cerească într-un interval mai mare de timp, se poate constata modul în care aspectul acesteia se schimbă de la un anotimp la altul. Este vorba de o consecință a mișcării orbitale a Pămîntului în jurul Soarelui, mișcare ce se efectuează în conformitate cu legile lui J. Kepler (1571—1630). Din cauza acestei mișcări, Soarele este văzut „deplasîndu-se" printre stele. Drumul aparent al Soarelui pe bolta cerească, de fapt proiecția orbitei Pămîntului pe firmament este un cerc mare (cu centrul în centrul sferei cerești) și se numește *ecliptică*.

1.2. Noțiuni de analiză spectrală

Așa cum am mai amintit, legătura dintre corpurile cerești și observatorul terestru este realizată prin intermediul radiațiilor electromagnetice, acestea din urmă fiind înregistrate cu ajutorul receptoarelor sensibile la lungimile de undă corespunzătoare.

Din fizică se știe că radiațiile emise de surse luminoase pot fi reprezentate prin unde transversale care se deplasează cu viteza luminii. Sensul geometric al unei lungimi de undă, λ, este schițat în figura 1.1. Prin urmare, lungimea de undă

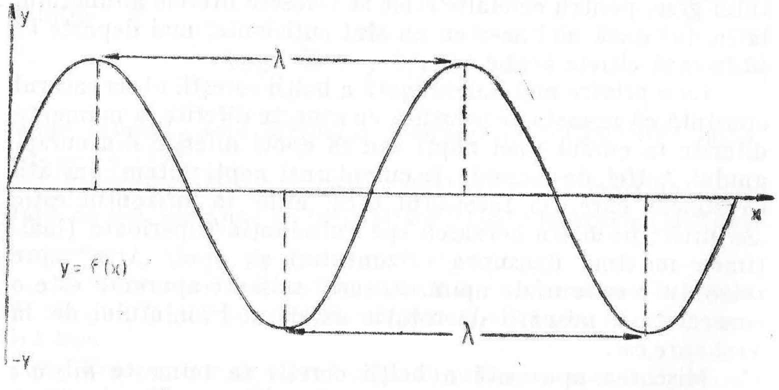


Fig. 1.1. Aspectul geometric al lungimii de undă.

se măsoară de-a lungul unei axe și poate fi exprimată în unitățile obișnuite pentru lungimi : mm, cm, m, ..., km etc.

Lungimea de undă, λ, se poate exprima și prin numărul de creste care trec printr-un punct dat, într-o secundă. Este vorba de frecvența ν care este legată de lungimea de undă prin relația :

$$\nu=\frac{c}{\lambda}$$

unde $c=3.10^{10}$ cm/s este viteza de propagare a luminii. Dacă și λ va fi exprimat în centimetri, frecvența ν va fi exprimată în herți (Hz) care îl reprezintă pe s^{-1}.

Pe de altă parte, energia fotonilor se poate exprima și ea prin lungimea de undă. În acest scop ne folosim de relația cunoscută :

$$E=h\nu=h\frac{c}{\lambda} \qquad (1,4)$$

unde $h=6.626\cdot10^{-27}$ erg/s este constanta lui M. Planck (1858—1947).

Dacă exprimăm viteza luminii în angströmi ($1\text{Å}=10^{-8}$ cm) pe secundă și energia în electronvolți ($1\text{ eV}=1.602\cdot10^{-12}$ ergi), avem $c=3\cdot10^{18}$ Å/s și 1 erg $=1$ eV$/1{,}602.10^{-12}$. Prin urmare, efectuînd înlocuirile mărimilor constante, din (1.4) rezultă :

$$E=\frac{3\cdot6{,}626}{1{,}602\,\lambda}\cdot10^{3}\text{eV}\rightarrow E=\frac{12{,}4}{\lambda}\text{ keV} \qquad (1.5)$$

unde 1 keV $=1\,000$ eV, λ fiind exprimat în angströmi.

Observațiile astronomice efectuate pînă la mijlocul secolului nostru aveau lungimile de undă definite prin inecuațiile $4\,000\text{Å}<\lambda<7\,000$ Å care definesc domeniul spectral *vizibil* sau *optic*. Dar, așa cum arată relația (1.5), pot să existe radiații cu lungimile de undă situate la stînga sau la dreapta domeniului vizibil și care să fie purtătoare ale unor cantități importante de energie. De aceea, spectrul electromagnetic cu $\lambda<4\,000$ Å și $\lambda>7\,000$ Å va defini domeniul spectral *invizibil* care, așa cum vom vedea, este alcătuit din mai multe regiuni ale căror radiații nu se pot înregistra cu aparatele de pe suprafața Pămîntului.

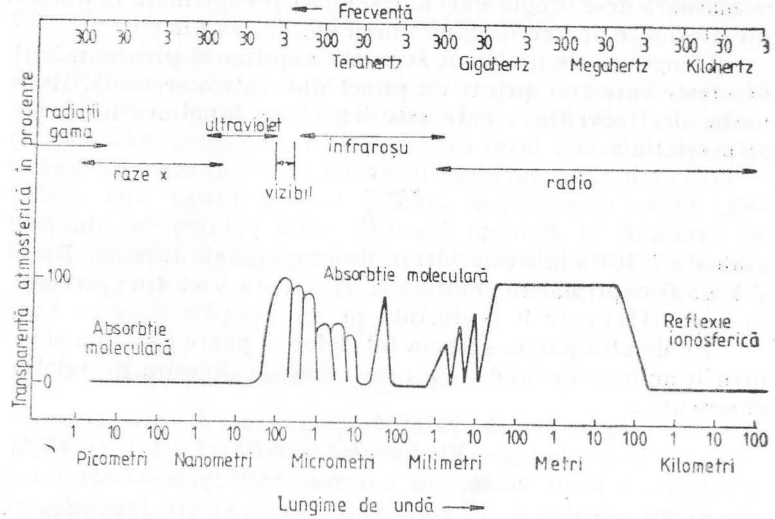


Fig. 1.2. Distribuţia lungimilor de undă de-a lungul spectrului electromagnetic. Scala de jos conţine lungimea de undă exprimată în metri. Pe scala de sus se găsesc frecvenţele exprimate în hertzi. Legătura dintre cele două scale este realizată prin formula (1.5). Extensiunea domeniilor spectrale este reprezentată pe linia mijlocie.

În figura 1.2 este prezentat schematic modul în care sînt distribuite poziţiile lungimilor de undă în spectrul electromagnetic. De aici se vede că atmosfera terestră are două ferestre prin care radiaţiile de la corpurile cereşti pot pătrunde pînă la suprafaţa Pămîntului: fereastra optică şi fereastra radio. Celelalte domenii spectrale (vezi fig. 1.2) au putut fi utilizate abia după ce receptoare corespunzătoare au fost lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre. Astăzi se poate înregistra întregul spectru electromagnetic; o parte din rezultatele obţinute pînă acum vor fi discutate în capitolele următoare. Prezentăm acum cîteva caracteristici ale domeniilor spectrale.

i) Urmărind figura 1.2 constatăm că radiaţiile cu cele mai mari lungimi de undă aparţin *domeniului radioundelor*. Diapazonul clasic al radioastronomiei este cuprins între

$\lambda=30$ m ($=3\cdot10^{11}$ Å) şi $\lambda=1$ cm ($=10^8$ Å), dar cu aparatele de la bordul unor nave cosmice au fost înregistrate unde radio cu λ de ordinul kilometrilor. Tot în domeniul radio sînt incluse şi lungimile de undă milimetrice, cu λ cuprins între 1 şi 10 mm (10^7 Å şi 10^8 Å), precum şi undele submilimetrice cu λ cuprins între 1 şi 0,3 mm (10^7 Å şi $3\cdot10^6$ Å).

ii) Infraroşul cuprinde o parte din domeniul undelor submilimetrice — *infraroşul îndepărtat* cu λ cuprins între 10^5 Å şi $3\cdot10^6$ Å. Radiaţiile cu lungimile de undă din acest domeniu pot fi înregistrate cu receptoarele de la bordul unor aerostate (baloane) sau avioane.

Infraroşul apropiat este definit prin 10^4 Å$<\lambda<10^5$ Å, astfel de radiaţii putînd fi recepţionate cu aparatele de la suprafaţa Pămîntului, prin utilizarea unor plăci fotografice sau celule fotoelectrice cu sensibilitatea corespunzătoare.

iii) *Diapazonul optic* sau clasic, cu lungimile de undă cuprinse între $3\cdot10^3$ Å şi 10^4 Å, este singurul domeniu spectral în care au fost efectuate observaţiile astronomice pînă în anul 1945.

iv) *Domeniul ultraviolet* apropiat este caracterizat prin lungimile de undă cuprinse între 3 000 Å şi 1 000 Å, pe cînd cel îndepărtat are lungimile de undă între 1 000 Å şi 100 Å. Aici, majoritatea observaţiilor au fost efectuate prin intermediul aparatelor de la bordul sateliţilor artificiali IUE şi *Copernicus*.

v) La *domeniul radiaţiilor* X distingem două regiuni: radiaţii X moi cu lungimile de undă cuprinse între 100 Å şi 10 Å (0,12 keV şi respectiv 1,2 keV), pe cînd la domeniul radiaţiilor X dure corespund lungimile de undă 10 Å$>\lambda>$1 Å (1,2 keV şi 12keV).

vi) Lungimile de undă mai mici de 1 Å$=$12 keV definesc domeniul spectral al *radiaţiilor gama*. Şi aici se pot distinge radiaţii moi şi dure.

Menţionăm acum şi faptul că pentru radiaţiile cu lungimi de undă mai mari este comod să utilizăm caracterul ondulatoriu al radiaţiei, pe cînd pentru lungimile de undă scurte sînt mai potrivite proprietăţile corpusculare.

*

La trecerea luminii printr-o prismă optică, în conformitate cu legile fizicii, ea este descompusă în fascicule de diferite

culori care sînt mai mult sau mai puțin deviate față de direcția inițială, după cum lungimile de undă corespunzătoare sînt mai lungi sau mai scurte. Radiațiile de culoare roșie sînt cel mai puțin deviate, pe cînd cele violete suferă cea mai mare deviație.

Mersul radiațiilor prin spectroscop este prezentat în figura 1.3. Lumina care vine de la o anumită sursă intră prin fanta f, trece mai departe sub formă de fascicul divergent. Lentila L_1 transformă fasciculul divergent în unul paralel, iar componentele acestuia cad pe prisma P.

În momentul cînd razele de lumină ating suprafața prismei, P, în conformitate cu legile fizicii ele sînt deviate spre baza prismei, deviația respectivă fiind o funcție de lungimea de undă.

Succesiunea de imagini ale fantei în diferite culori constituie spectrul sursei luminoase de la care vine lumina spre fantă.

Cercetările efectuate au arătat că intensitatea spectrală S în spectrul unei surse se poate exprima printr-o *funcție putere* unde lungimea de undă, λ, este variabila independentă. Pentru o astfel de funcție s-a acceptat forma :

$$S_{\lambda} \propto \lambda^{\alpha}, \qquad (1.6)$$

unde α reprezintă *indicele spectral* și poate avea valori diferite pentru domenii spectrale diferite.

În cazul cînd sursa de lumină este o lampă de sodiu, pe ecranul E al desenului din figura 1.3 apare o linie galbenă strălucitoare, este linia D a sodiului. La o lampă cu mercur apar mai multe linii : patru roșii, una galbenă, una verde și una violetă. Astfel de spectre corespund luminii emise de vapori

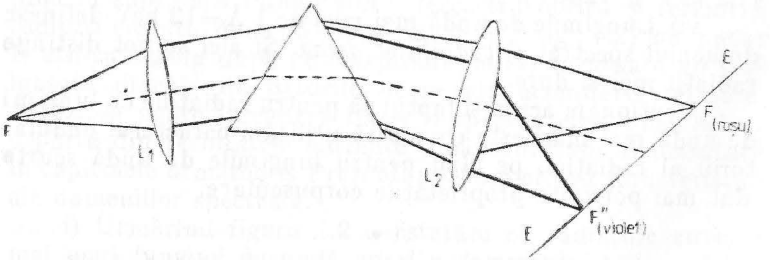


Fig. 1.3. Schema de principiu a spectroscopului.

și gaze destul de rarefiate, dar aduse la starea de incandescență. Ele se numesc spectre de linii luminoase sau *spectre cu linii de emisie*. În astfel de situații, imaginile luminoase ale liniilor se pot suprapune peste fondul mai puțin strălucitor al spectrului continuu.

Deseori, pe fondul luminos al spectrului continuu se suprapun imaginile unor linii „obscure" — linii de absorbție care sînt determinate de prezența anumitor gaze rarefiate și relativ reci care ar putea fi situate undeva între sursa luminoasă și observatorul terestru.

Apariția liniilor obscure în spectrele surselor luminoase se produce în conformitate cu prima lege a lui G. R. Kirchoff (1824—1887) în baza căreia orice gaz rarefiat absoarbe radiațiile cu lungimile de undă pe care el le-ar putea emite cînd este adus la starea de incandescență.

1.3. Temperaturi stelare

În astronomie, ca și în fizică, conceptul de temperatură reprezintă o noțiune asociată cu o anumită stare fizică bine determinată a corpului considerat. Utilizarea diviziunilor de pe scala unui termometru, care este pus în contact cu un anumit corp, este procedeul cel mai des întîlnit în practică pentru determinarea mărimii acestui parametru.

În cazul stelelor, noi nu putem pune un termometru în contact cu steaua considerată și să-i măsurăm temperatura. De aceea, aici se pune problema găsirii unor metode diferite pentru analiza datelor observaționale de unde să rezulte și temperatura.

i) *Temperatura cinetică* este un parametru legat de mișcarea moleculelor (sau, mai general, a particulelor) de gaz, din care este constituită steaua respectivă. În acest caz, temperatura apare ca un parametru care definește energia cinetică, E_c, prin relația :

$$E_c = \frac{3}{2} k T_c = \frac{1}{2} m v^2, \qquad (1.7)$$

unde k=constanta lui Boltzmann, T_c = temperatura cinetică, m = masa și v = viteza de mișcare a moleculelor de gaz.

ii) *Temperatura de radiație* este definită ca un parametru care intervine în legătura dintre intensitatea radiației și lungimea de undă corespunzătoare, λ. Matematic, această legătură este exprimată prin formula lui Planck:

$$I_{\lambda,T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}, \tag{1.8}$$

unde e = baza logaritmilor neperieni.

Formula lui Planck (1.8) este valabilă pentru radiații monocromatice, adică pentru o radiație de o anumită lungime de undă.

Dacă se consideră T = const., pentru diferite valori λ se obțin diferite mărimi I_λ și se poate trasa o curbă care va avea un maxim pentru $\lambda = \lambda_{max}$. Pentru o astfel de situație W. Wien (1864–1928) a stabilit relația:

$$\lambda_{max} = \frac{C}{T}, \tag{1.9}$$

unde C este o mărime constantă.

Dacă la o stea se măsoară intensitatea radiației I_λ pentru diferite valori ale lui λ și se construiește graficul funcției $I_\lambda = f(\lambda)$ putem determina lungimea de undă λ_{max} la care I_λ are valoarea maximă. Înlocuind acum pe λ_{max} în (1.9) se determină temperatura.

În figura 1.4 sînt reprezentate curbele de forma $I_\lambda = f(\lambda)$, de aici se evidențiază deplasarea lui λ_{max} de la dreapta spre stînga atunci cînd temperatura crește.

Temperatura de radiație este o temperatură de suprafață, deoarece se obține din radiația care vine de la suprafața stelei (de la fotosferă).

Menționăm aici faptul că formulele (1.8) și (1.9) se aplică riguros numai la așa-numitul „corp negru", adică unui corp care absoarbe toată radiația incidentă. Este un corp perfect absorbant pentru radiațiile de toate lungimile de undă.

Analogia dintre stele și un corp negru este justificată prin aceea că radiațiile stelare provin din interiorul respectiv, sînt absorbite și reemise de păturile exterioare.

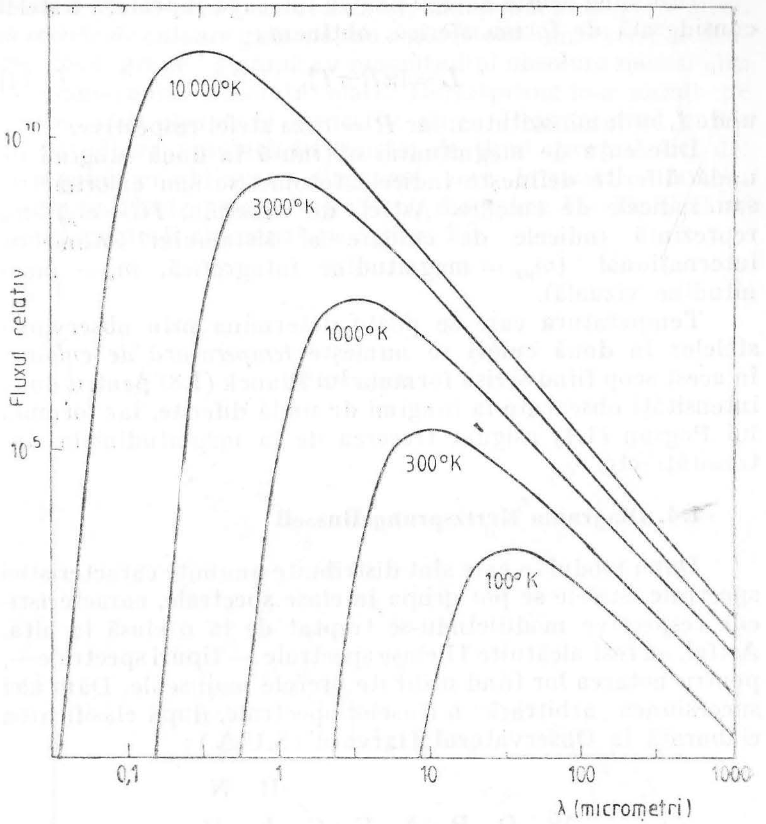


Fig. 1.4. Curbele de distribuție a intensității radiației pentru temperaturi constante.

Dacă admitem că o stea radiază ca un corp negru, atunci energia totală emisă pe secundă la toate lungimile de undă, de către un centimetru pătrat din suprafața corespunzătoare, este dată de formula:

$$\varepsilon = \sigma T_e^4, \tag{1.10}$$

unde σ este o mărime constantă, T_e = temperatura efectivă.

Însumînd aceste energii pentru întreaga suprafață a stelei considerată de forma sferică, obținem:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4, \qquad (1.11)$$

unde L = luminozitatea, iar R = raza stelei respective.

Diferența de magnitudini obținută la două lungimi de undă diferite definește indicele fotometric sau calorimetric sau indicele de culoare. Astfel, de exemplu, $IC = m_{pg} - m_v$ reprezintă indicele de culoare al sistemului fotometric internațional (m_{pg} = magnitudine fotografică, m_v = magnitudine vizuală).

Temperatura care se poate determina prin observarea stelelor în două culori se numește *temperatură de culoare*, în acest scop fiind scrisă formula lui Planck (1.8) pentru două intensități observate la lungimi de undă diferite, iar formula lui Pogson (1.1) asigură trecerea de la magnitudini la intensități etc.

1.4. Diagrama Hertzsprung-Russell

După modul în care sînt distribuite anumite caracteristici spectrale, stelele se pot grupa în clase spectrale, caracteristicile respective modificîndu-se treptat de la o clasă la alta. Astfel, au fost alcătuite 11 clase spectrale — tipuri spectrale —, pentru notarea lor fiind utilizate literele majuscule. Dăm aici succesiunea „arbitrară" a claselor spectrale, după clasificarea elaborată la Observatorul Harvard (S.U.A.):

```
                   R — N
                  /
W — O — B — A — F — G — K — M
                        \
                         S
```

Clasele W și O se numesc clase timpurii, pe cînd clasele K, M, N și S reprezintă clasele tîrzii. Trecerea de la clasele timpurii spre cele tîrzii se face prin reducerea temperaturii de la 35 000 K (grade Kelvin) la 3 000 K pentru clasele O și respectiv M. Fiecare clasă spectrală este caracterizată prin prezența anumitor linii sau benzi spectrale.

Cercetînd corelația existentă între magnitudinea absolută, M, și tipul spectral, E. Hertzsprung (1873—1967) și H. N.

Russell (1877—1957) au constatat, independent unul de altul, că stelele de culoare galbenă sau roșie (stelele mai reci) alcătuiesc două grupe; o grupă cu magnitudini absolute mici și alta cu magnitudini absolute mari. Hertzsprung le-a numit pe acestea *stele gigante* și respectiv *pitice*. Reprezentînd grafic magnitudinea absolută în funcție de tipul spectral, cei doi astronomi au obținut o diagramă care le poartă numele, diagrama Hertzsprung-Russell sau diagrama H—R, al cărui aspect poate fi examinat pe figura 1.5.

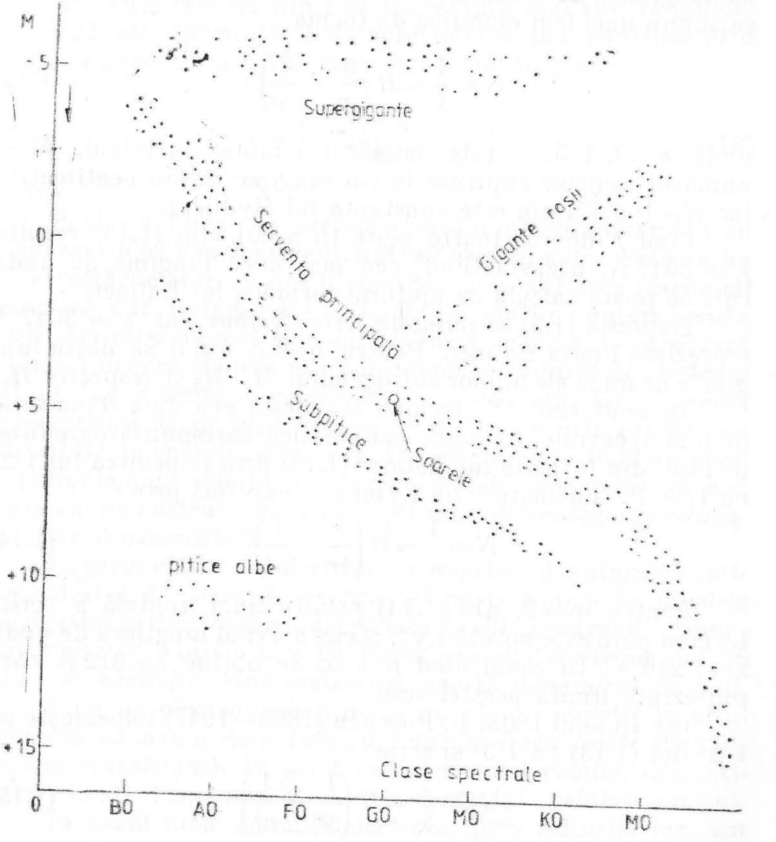


Fig. 1.5. Diagrama Hertzsprung-Russell.

În unele cazuri, în ordonata din figura 1.5, prin intermediul relației (1.3), magnitudinile absolute sînt înlocuite prin luminozități, fapt pentru care diagrama H—R este întîlnită și sub denumirea de *diagramă spectru-luminozitate*.

1.5. Serii de linii spectrale

i) În jurul anului 1885, Johann Balmer (1825—1898), un modest profesor la Gimnaziul din Basel (Elveția), constată că lungimile de undă ale liniilor spectrale ale hidrogenului se supun unei legi empirice de forma

$$N=\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right); \qquad (1.13)$$

unde $n=3, 4, 5, \ldots$ este numărul cuantic principal, N = numărul undelor cuprinse într-o lungime de un centimetru, iar $R=109.677/\text{cm}$ este constanta lui Rydberg.

Cînd n devine foarte mare ($n \approx \infty$), din (1.13) rezultă $\lambda = 3647$ Å, aceasta fiind cea mai mică lungime de undă care se poate calcula cu ajutorul formulei lui Balmer.

Expresia (1.3) se numește *serie Balmer*, iar $\lambda = 3647$ Å reprezintă limita Balmer. Pentru $n = 3, 4$ și 5 se obțin lungimile de undă ale liniilor hidrogenului H_α, H_β și respectiv H_γ.

În anul 1905, T. Lyman stabilește cea de-a doua serie de linii spectrale, expresia matematică corespunzătoare fiind dedusă din formula lui Balmer (1.13) prin înlocuirea lui $1/2^2$ cu $1/1^2$. Prin urmare seria Lyman se exprimă prin:

$$N=\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right). \qquad (1.14)$$

Pentru $n = 2$, din (1.14) rezultă linia frontală a seriei Lyman care este notată Ly_α, aceasta avînd lungimea de undă $\lambda=1\,216$ Å. În cazul cînd $n=\infty$ se obține $\lambda=912$ Å care reprezintă limita acestei serii.

iii) În anul 1908, F. Paschen (1865—1947) înlocuiește pe $1/2^2$ din (1.13) cu $1/3^2$ și scrie:

$$N=\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad (1.15)$$

care este cunoscută sub denumirea de *serie Paschen*.

În mod analog s-a stabilit seria lui F. S. Brackett:

$$N=\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad (1.16)$$

și seria lui A. H. Pfund (stabilită în anul 1922) care este de forma:

$$N=\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{5^2}-\frac{1}{n^2}\right). \qquad (1.17)$$

Așa cum rezultă din cele prezentate mai sus, lungimile de undă ale diferitelor linii spectrale se pot exprima prin formula generală a lui Balmer scrisă sub forma:

$$N=\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right), \qquad (1.18)$$

cu $m=\overline{1,5}$.

Pentru explicarea teoretică a seriilor de linii spectrale s-au elaborat diferite modele pentru structura atomului. Este vorba de cercetările care au dus la apariția și dezvoltarea mecanicii cuantice, dar asupra unor astfel de cercetări nu putem insista aici. Amintim numai că s-au elaborat modele de structură atomică în care nucleul este considerat înconjurat de electroni situați pe diferite nivele energetice discrete, iar trecerea electronului de pe un nivel pe altul are loc prin emisie sau absorbție de energie, după cum trecerea are loc de la un nivel superior la unul inferior sau invers. Nivelul energetic cel mai apropiat de nucleul atomic și cu cea mai mică energie se numește *stare fundamentală*.

În cazul cînd unui electron i se imprimă din afară o cantitate destul de mare de energie, el poate ajunge la nivelele energetice periferice sau chiar să iasă de sub „controlul" atomului respectiv. Atomii care își pierd anumiți electroni sînt în *stare de excitație*, sînt ionizați și poartă denumirea de *ioni*.

Cînd un electron trece de la un nivel energetic la altul spunem că avem de-a face cu *tranziții legate-legate* (bound-bound transitions). În acest caz electronul rămîne în continuare în sînul aceluiași atom (sub controlul aceluiași nucleu).

În cazul cînd anumiți electroni, prin salturile lor, vor părăsi atomul, va fi vorba de *tranziții legat-libere* (bound-

free transitions). Aici avem de-a face cu gazul ionizat, electronul a fost legat, dar a devenit liber.

În natură există destul de mulți electroni cu mișcare spațială liberă care, datorită anumitor condiții, au părăsit definitiv atomii de care aparțineau. Unii dintre aceștia se pot apropia destul de mult de anumiți atomi ionizați care-i captează și-i obligă să se miște pe nivele energetice discrete. Într-un astfel de caz avem de-a face cu *tranziții liber-legate*.

În fine, în analogie cu cele prezentate mai sus, am putea să mai amintim și *tranzițiile liber-libere*, în care electronul liber, ocazional, se apropie de un nucleu atomic care-l va determina să se miște mai departe pe o traiectorie hiperbolică. Electronul rămîne liber și pe mai departe, el nefiind supus captării.

1.6. Elemente de teoria radiației

În anul 1932, fizicianul american Carl David Anderson (n. 1905) a constatat că în razele cosmice (radiații venite din cosmos, dar de natură necunoscută) se află două particule gemene cu mase egale, dar cu sarcini electrice opuse. Una dintre aceste particule era electronul cu sarcină negativă, iar perechea ei avea sarcină pozitivă, de aici și denumirea de *pozitron* pe care P.A.M. Dirac (n. 1902), în urma unor cercetări teoretice, îl prevăzuse încă prin anul 1928. Era vorba de o antiparticulă — antielectronul.

Cercetări asemănătoare au dus la ipoteza, și chiar descoperirea, altor antiparticule: antiprotonul, antineutronul etc. Iată de ce astăzi se consideră că în Universul nostru ar putea să existe regiuni alcătuite din antiparticule, regiuni umplute cu antimaterie[1].

Tot prin anul 1932 s-a constatat că atunci cînd un atom este bombardat cu particule α (alfa) (=nuclee de heliu, $_2^4He$,

[1] Particulele elementare au o serie de proprietăți fizice dintre care unele sînt caracterizate prin semnul algebric *plus* sau *minus*. În cazul particulelor cu sarcină electrică, semnul plus sau minus stabilește deosebirea dintre particulă și antiparticula corespunzătoare. Deosebirea dintre antiparticulă și particula neutră este determinată de diferența de semn a momentului magnetic, precum și a altor caracteristici.

care au rezultat din atomii de heliu prin pierderea învelișului de electroni), din nucleul atomic au fost smulse particule cu sarcină nulă — *neutroni*. De aici a rezultat concluzia că nucleele atomice sînt compuse din protoni și neutroni, componentele respective ale atomului purtînd denumirea de nucleoni.

Existența neutronului a fost postulată încă de către E. Rutherford (1871—1937) prin anul 1920, dar a fost descoperit abia în anul 1932 de către James Chadwick (1891—1947) care i-a atribuit denumirea respectivă.

În urma examinării unor probleme legate de structura materiei s-a constatat că, pe la partea finală a tabloului periodic al elementelor chimice, unele elemente au structuri instabile. La astfel de elemente au fost detectate așa-numitele catastrofe; prin dezintegrare unele elemente se transformă în alte elemente. Pentru acestea s-a introdus noțiunea de *element radioactiv*; aici protonul (nucleul atomului de hidrogen) este o particulă stabilă, pe cînd neutronul se dezintegrează după schema:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \qquad (1.19)$$

unde un neutron (n) se transformă într-un proton (p), un electron (e^-) și un antineutrin ($\bar{\nu}_e$)[1].

Timpul în care jumătate din numărul de atomi ai unui element chimic se transformă în atomi ai altui element se numește *timp de înjumătățire* și reprezintă un parametru important pentru fiecare element radioactiv.

În mod practic, s-a constatat că atunci cînd se produce dezintegrarea unui atom de uraniu este emisă o particulă α (heliu de două ori ionizat); este vorba de *dezintegrarea α*. O dezintegrare de acest fel întîlnim la elementele chimice cu numărul atomic $Z > 82$. Ea se explică prin aceea că particulele α se găsesc în nucleele atomilor, adică ele pot să apară din alte particule cum sînt nucleonii, de exemplu.

În cazul dezintegrării atomului de uraniu a apărut izotopul acestuia, notat prin X_1, care este mult mai stabil. Acesta

[1] Neutrinul este o particulă elementară cu masa extrem de mică. A fost prevăzut teoretic de către W. Pauli (n. 1900) în anul 1932, existența lui fiind confirmată abia în anul 1956.

din urmă are timpul de înjumătățire de 24 zile, după care atomul respectiv se dezintegrează și emite un electron, e^-, procesul respectiv fiind numit *dezintegrare* β^-. Prin urmare, de data aceasta ne referim la emisia unor particule care nu există sub nici o formă în nucleu. Explicația acestei emisii constă în aceea că, deși neutronul și protonul sînt numite particule elementare, totuși ele se pot transforma una în alta. Neutronul se transformă în proton prin emiterea unui electron, e^- — dezintegrare β^-. În schimb, protonul se transformă în neutron prin emisia unui pozitron (e^+) — dezintegrarea β^+.

În interiorul adînc al stelelor temperaturile sînt foarte mari, particulele circulă cu viteze mari, iar atomii sînt complet ionizați. De aceea, în cele ce urmează putem vorbi de nuclee în loc de atomi. În aceste condiții, două nuclee de hidrogen, adică doi protoni, se pot ciocni, rezultînd astfel un nucleu nou, mult mai complex. O reacție de acest fel se scrie sub forma:

$$^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^2_1H + e^+ + \nu, \qquad (1.20)$$

unde ^2_1H este un izotop al hidrogenului, numit și deuteriu ^2_1D, care constă dintr-un neutron și un proton. Prin urmare, un proton s-a păstrat, iar celălalt s-a transformat într-un neutron (n), un pozitron e^+ și un neutrin ν.

Transformarea celui de al doilea proton s-a efectuat în conformitate cu reacția:

$$^1_1H \rightarrow n + e^+ + \nu. \qquad (1.21)$$

Particula e^+ găsește foarte repede un electron liber cu care se unește și se anihilează reciproc, lăsînd în urma lor o emisie de radiații gama, în conformitate cu relația:

$$e^+ + e^- \rightarrow \text{radiație gama}, \qquad (1.22)$$

prin care s-a eliberat o cantitate de 1,44 MeV (milioane de electronvolți).

Atomul sau nucleul greu de hidrogen ^2_1H, sau deuteriul se întîlnește cu un alt proton și are loc reacția:

$$^2_1H + ^1_1H \rightarrow ^3_1He + \text{radiații gama}, \qquad (1.23)$$

prin care se eliberează o energie de 5,5 MeV și se formează un izotop al heliului.

Considerînd că există cel puțin două serii de reacții prin care se obține nucleul de heliu ^4_2He, putem scrie

$$^3_2H_e + ^3_2H_e \rightarrow ^4_2H_e + ^1_1H + ^1_1H + \text{radiații gama}. \qquad (1.24)$$

Procesul prin care s-a explicat aici emisia de energie poartă denumirea de *lanțul proton-proton*, prin intermediul căruia se eliberează peste 26,2 MeV. Acest proces are loc în stelele asemănătoare cu Soarele. În cazul unor stele mai masive, reacțiile respective devin ceva mai complicate, ele fiind cunoscute sub denumirile: ciclul carbon nitrogen, reacțiile triplu α, arderea carbonului etc.

Reacțiile termonucleare despre care am vorbit mai sus asigură radiațiile cu lungimile de undă corespunzătoare domeniilor spectrale: optic (vizual), ultraviolet și infraroșii, radiațiile gama putînd fi determinate prin anihilarea dintre un pozitron și un electron, conform relației (1.22). De aceea, se consideră că multe erupții de energie cosmică ar putea fi o consecință a întîlnirilor dintre materie și antimaterie. Iată de ce, despre existența radiațiilor gama se vorbea deja cu mult timp înaintea apariției astronomiei invizibilului.

Dacă liniile spectrale corespunzătoare domeniilor optic și cele adiacente lui sînt determinate de păturile energetice de la „periferiile" atomilor, radiațiile X sînt legate de păturile energetice din „interior" unde de obicei sînt prezenți toți electronii posibili.

După cum se știe, radiațiile X au fost puse în evidență pe cale experimentală, în anul 1895, de către fizicianul german Wilhelm Conrad Roentgen (1845 — 1923). Ele se produc atunci cînd o placă metalică (anticatodul) este bombardat cu un torent de electroni foarte rapizi. În astfel de cazuri, unele „proiectile" vor contribui la „ridicarea" unui electron de la starea normală la un nivel superior de energie, de unde revine prin eliberarea unei radiații (a unui foton) în domeniul optic, violet sau infraroșu. În schimb, alți electroni — proiectile — vor intra în păturile adînci ale atomului, de unde vor smulge electroni cu energii foarte mari, fiind vorba, așadar, de eliberarea unor fotoni cu lungimile de undă de 2—3 ori mai mici decît acele ale domeniului optic sau ultravioleti

Fotonii, puși în libertate și deplasîndu-se cu viteza luminii pot să întîlnească, în drumul lor, electroni cu mișcări mult mai

lente. Printr-o astfel de întîlnire („ciocnire") fotonul pierde din energie, în schimb se mărește viteza electronului pe seama energiei primite de la foton. Prin urmare, după ciocnire energia fotonului scade, lungimea de undă a lui crește, pe cînd energia electronului a crescut cu cantitatea pierdută de foton. Acest fenomen a fost semnalat în anul 1922 de către Arthur Holly Compton (1892–1962) și este numit *efect Compton*.

Dar dacă procesele fizice sînt de așa natură încît energia fotonului crește pe seama energiei pierdute de electron, vom avea de-a face cu *efectul Compton invers*. Acest efect poate fi întîlnit și la producerea radiațiilor gama, cînd electronii relativiști, care se mișcă cu viteze apropiate de viteza luminii, lovesc fotonii cărora le imprimă energie.

În prezența unui cîmp magnetic, traiectoriile electronilor au forma unor spirale înfășurate în jurul liniilor de forță. Este vorba de o variație continuă a vitezei corespunzătoare, fapt care determină o variație continuă a energiei și, prin aceasta, se produce o emisie continuă de energie cunoscută sub denumirea de *radiație sincrotron*.

În general, electronii emit o radiație electromagnetică de fiecare dată cînd sînt supuși unei accelerații sau frînări. Astfel, de exemplu, cînd ei trec prin vecinătatea unui nucleu atomic, electronii suferă o frînare puternică, iar surplusul de energie cinetică este eliberat sub formă de fotoni. Această radiație de frînare se mai numește uneori, *bremsstrahlung*, denumire luată din literatura germană.

În spațiul interstelar intensitatea cîmpului magnetic este foarte redusă (10^{-8} Gs), de aceea electronii relativiști emit energie în domeniul frecvențelor mici, la lungimi de undă mari. Avem de-a face cu emisia în *domeniul undelor radio*. Dar dacă electronii relativiști trec pe lîngă obiecte cu cîmpuri magnetice intense, radiația sincrotron corespunzătoare este emisă în domeniul radiațiilor X sau gama.

Referindu-ne aici la natura radiațiilor electromagnetice amintim și existența radiației termice, despre prezența căreia ne convingem atunci cînd încălzim un corp solid. Un astfel de corp, adus la starea de incandescență, emite la început radiații calorice, apoi, pe măsură ce temperatura crește, apar radiații cu lungimile de undă din ce în ce mai scurte.

Radiația corpului negru și, prin urmare, radiația stelară este de natură termică.

În fiecare punct al spațiului în care se propagă o undă electromagnetică, vectorii care reprezintă intensitatea E a cîmpului electric și intensitatea H a cîmpului magnetic sînt egali și perpendiculari unul pe altul. În plus, acești doi vectori sînt perpendiculari pe direcția de propagare a undei respective (vezi fig. 1.6 a)

Dacă ne referim, de exemplu, la vectorul electric, $\vec{E}$, în cursul propagării unei unde el se poate modifica atît ca mărime, cît și în orientare. În cazul cînd variațiile respective se produc după anumite legi spunem că avem de-a face cu *lumină polarizată*. În figura 1.6 b este prezentată deplasarea vectorului $\vec{E}$ în direcția axei pozitive OX, orientarea lui păstrînd tot timpul o direcție paralelă cu axa OE. În acest caz este vorba de lumina *plan polarizată*. Apoi, ne imaginăm că în timp ce vectorul $\vec{E}$ se deplasează spre dreapta, extremitatea lui s-ar putea roti în jurul axei OX, astfel încît să se efectueze o rotație completă în timpul în care el parcurge un spațiu egal cu o lungime de undă. În acest timp vîrful lui $\vec{E}$ descrie o elice, iar unda respectivă se numește *circular polarizată*. La *lumina polarizată eliptic* extremitatea lui $\vec{E}$ descrie o elipsă.

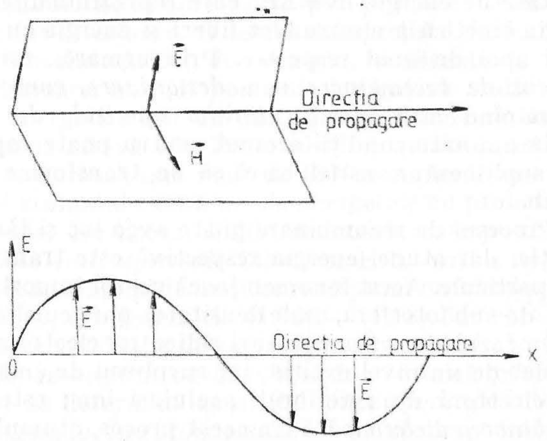


Fig. 1.6. Schema de principiu a procesului de polarizare a luminii : a) vectorii componenți ai radiației luminoase ; b) reprezentarea geometrică a luminii plan-polarizată.

Lumina se numeşte *liniar polarizată* dacă vectorul $\vec{E}$ este tot timpul orientat de-a lungul unei drepte care trece printr-un punct fix al spaţiului. La lumina nepolarizată, vectorul $\vec{E}$ poate avea orientări diferite la momente diferite, fără a se putea stabili o tendinţă generală.

Am ţinut să amintim aici problema polarizării luminii, deoarece ea ne ajută să deosebim radiaţia sincrotron, care este polarizată, de radiaţia termică nepolarizată.

Energia fotonilor din radiaţia *bremsstrahlung* provine de la energia cinetică a electronilor, aceasta din urmă putînd fi de natură termică sau netermică.

Emisia radio a coroanei solare reprezintă un exemplu de *bremsstrahlung* termic. Pe de altă parte, radiaţiile X emise în timpul unor aurore polare, la altitudinea de circa 90 km în atmosfera terestră, sînt determinate de electronii cu energii mari şi care sînt de natură netermică.

După cum s-a arătat, atunci cînd electronii părăsesc atomul, acesta din urmă devine ionizat, atomul neutru se transformă într-un ion pozitiv. Dar fenomenul poate avea loc şi invers, electronii liberi, care au o anumită energie cinetică pot fi captaţi de către un ion. În acest caz se eliberează o cantitate de energie $h\nu = \Delta E$, care reprezintă diferenţa dintre energia cinetică a electronilor liberi şi energia cu care ei sînt legaţi apoi de ionul respectiv. Prin urmare, este vorba de *procesul de recombinare* sau *dezionizare*, energia eliberată determinînd aici apariţia *liniilor spectrale de recombinare*

În anumite condiţii atomul neutru poate capta un electron suplimentar, astfel ca el să se transforme într-un *ion negativ*.

Procesul de recombinare poate avea loc şi fără emisie de radiaţie, dar atunci energia respectivă este transmisă unei a treia particule. Acest fenomen joacă un rol important în straturile de sub fotosferă, unde densitatea particulelor este mare.

În cazul unor temperaturi ridicate, electronul captat se „prinde“ de un nivel excitat, iar surplusul de energie îl predă altor electroni din interiorul aceluiaşi ion; este vorba de *recombinarea dielectrică*. Prin acest proces, atomul dobîndeşte iarăşi condiţii favorabile pentru dezintegrare, descompunîndu-se în electron şi ion neexcitat. De aceea, în atmosferele stelare se pot detecta mai puţini ioni pentru metalele alcaline.

Notarea liniilor de recombinare se face în modul următor: la început se scrie simbolul elementului chimic, apoi numărul cuantic principal al nivelului inferior şi, în fine, litera grecească cu care se marchează diferenţa numerelor cuantice ale nivelelor la care s-a efectuat trecerea. Astfel, de exemplu, $H_{109\alpha}$ arată că este vorba de o linie de recombinare a hidrogenului cînd electronul a trecut de la nivelul $n = 110$ la nivelul cu $n = 109$ şi $\alpha = \Delta n = 1$; sau $C_{166\beta}$ reprezintă linia de recombinare a carbonului cu trecerea de la nivelul $n = 168$ la nivelul cu $n = 166$ şi $\Delta n = \beta = 2$.

Din cercetarea liniilor de recombinare ale unor elemente chimice se obţin informaţii despre emisia nebuloaselor planetare, norii de hidrogen ionizat (H II), regiuni în care are loc formarea stelelor etc. Se obţin informaţii despre compoziţia chimică şi starea de excitare şi ionizare a plasmei în Univers. Se poate determina temperatura electronică şi abundenţa elementelor chimice.

Existenţa liniilor de recombinare a fost prevăzută teoretic prin anul 1959 de către N. Kardaşev, dar ele au fost observate numai cu cinci ani mai tîrziu.

În interiorul unui atom pot exista şi aşa-numitele nivele energetice stabile, de la care nu se pot produce tranziţii la stări energetice inferioare. O astfel de oprelişte, însă, nu are un caracter absolut. Astfel, de exemplu, în absenţa unor perturbaţii exterioare, atomul poate să-şi menţină stabile anumite nivele energetice într-un timp care să dureze de la 10^{-5} secunde pînă la cîteva zile. Pe nivelele obişnuite o astfel de stabilitate nu durează mai mult de 10^{-8} secunde. Prin urmare în interiorul atomului există nivele energetice cu probabilităţi mici de emisie. De aceea, liniile de emisie corespunzătoare lor se numesc *linii spectrale interzise*. Este vorba de liniile care au anumite lungimi de undă ce corespund numărului cuantic principal, *n*, din formulele (1.13) — (1.18) dar care nu se pot produce în condiţiile de pe Pămînt. În schimb, în condiţiile cosmice, în regiuni cu densitate foarte mică pot exista condiţii care să determine apariţia liniilor spectrale interzise. Astfel, de exemplu, în coroana solară s-au observat linii spectrale care, mult timp, nu au putut fi identificate cu liniile unor surse terestre cunoscute. Abia în anul 1942 s-a constatat că nu este vorba de existenţa faimosului element nou „co-

roniu". Analizele datelor observaţionale au arătat că aici ne întîlnim cu liniile interzise ale unor atomi cu un înalt grad de ionizare, de exemplu linia interzisă a fierului de 22 de ori ionizat ($\lambda = 5\,302{,}86$ Å). De asemenea, în nebuloasele planetare au fost detectate liniile interzise ale oxigenului o dată şi de două ori ionizat, cu lungimile de undă de 3 727 Å şi 4 959 Å.

În fine, mai amintim şi *liniile spectrale de rezonanţă*, care apar atunci cînd au loc tranziţiile permise de la nivelul cu cel mai înalt grad de excitaţie la nivelul energetic fundamental. În astfel de condiţii se produc liniile din spectrul unui element dat care, de obicei, apar în domeniul ultraviolet şi optic.

1.7. Structura heliocentrică a sistemului solar

Referindu-ne, în continuare, la aparenţa şi realitatea de pe bolta cerească, trebuie să amintim mişcările aparente ale planetelor care sînt o consecinţă a mişcării lor pe orbite circumsolare. Din această cauză, observatorul terestru vede planetele în diferite direcţii în raport cu Soarele, fapt care face ca, pe bolta cerească, ele să descrie trasee destul de com-

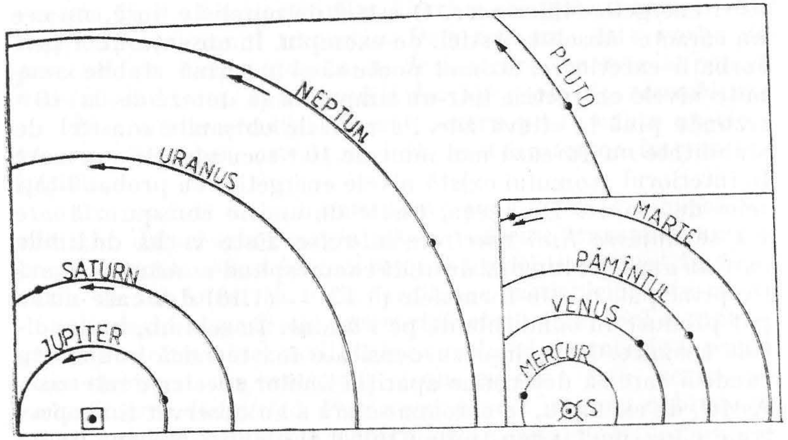


Fig. 1.7. Schema structurii heliocentrice a sistemului solar. Pătratul din stînga jos este prezentat la o scală mărită în partea dreaptă.

plicate. Dar despre astfel de fenomene am mai scris cu alte ocazii; acum reamintim numai faptul că în jurul Soarelui se mişcă, pe orbitele corespunzătoare, în ordinea depărtării: Mercur, Venus, Pămîntul, Marte, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun şi Pluto. Acestea sînt cunoscute ca fiind planetele mari ale sistemului solar. În plus, pe bolta cerească, cu aparatele optice, se mai pot observa planetele mici care, din cauza asemănării imaginilor lor cu cele ale stelelor se numesc şi *asteroizi*.

La sistemul solar mai trebuie să amintim meteorii şi meteoriţii care pe bolta cerească apar ca nişte „stele căzătoare", precum şi cometele care vin de undeva de la periferia sistemului solar.

Schematic, structura heliocentrică a sistemului solar este prezentată în figura 1.7.

1.8. Sistemul nostru stelar — Galaxia

Aruncînd o privire asupra cerului înstelat într-o noapte senină şi fără lună, ne convingem cu uşurinţă de faptul că ne aflăm într-o lume a stelelor care ne înconjoară din toate părţile. O observare mai atentă însă ne arată că există o tendinţă de înghesuire a stelelor spre acea fîşie albicioasă care parcă ar vrea să împartă cerul în două emisfere. Este vorba de Calea Lactee despre care Galileo Galilei spunea că este alcătuită dintr-o mulţime nenumărabilă de stele.

În urma succesului obţinut de astronomi la determinarea distanţelor stelare, a devenit posibilă cercetarea repartiţiei stelelor în spaţiu. De aici a rezultat concluzia că acea fîşie albicioasă — Calea Lactee — este un efect de perspectivă, fiind o consecinţă a proiecţiei stelelor pe bolta cerească. De fapt, toate stelele pe care le observăm cu ochiul liber fac parte dintr-un sistem de stele care, în spaţiu, ocupă un volum relativ mic. Acest sistem se aseamănă cu o lentilă biconvexă cu diametrul mare de 100 000 ani lumină, pe cînd diametrul mic este de numai 16 000 ani lumină. Avem de-a face cu o familie de circa 200 miliarde de stele — sistemul nostru stelar care în literatura astonomică este cunoscut sub denumirea de *Galaxia noastră*. Termenul „Galaxie" provine de la denumirea folosită în Grecia antică *galaxias kyklos* (cercul de lapte).

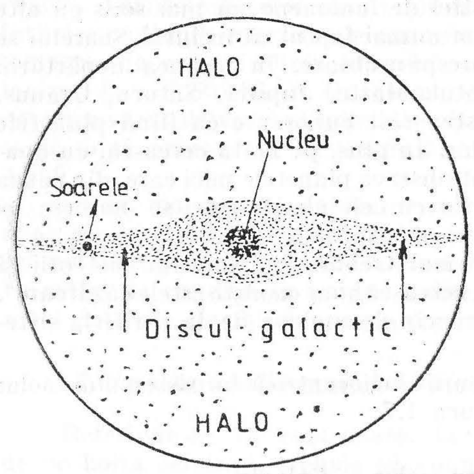


Fig. 1.8. Secțiune schematică prin Galaxie.

Uneori se mai utilizează și denumirea de Calea Lactee. O schemă a formei Galaxiei este prezentată pe figura 1.8.

Planul care trece prin centrul Galaxiei și conține toate diametrele mari ale acesteia este un plan de simetrie și se numește *plan galactic*. Dreapta care trece prin centrul Galaxiei și este perpendiculară pe planul galactic reprezintă *axa de simetrie*.

Soarele se găsește în planul galactic la distanța de circa 30 000 ani lumină de la centrul Galaxiei.

În vecinătatea Soarelui, Galaxia efectuează o rotație completă în decurs de 275 milioane ani, acest interval de timp reprezentînd durata anului galactic. Vîrsta Galaxiei este apreciată la 10 — 14 miliarde ani.

Din analiza modului în care sînt distribuite stelele mai luminoase și a materiei interstelare, s-a ajuns la concluzia că Galaxia are o structură spirală. Încă nu se știe precis dacă spirele respective — brațele spirale — sînt în curs de înfășurare sau desfășurare. Nu se cunoaște destul de bine nici numărul total de brațe spirale. De asemenea, regiunea centrală a Galaxiei este prea puțin cunoscută, deși observațiile în infraroșu și radio au adus contribuții importante.

În componența Galaxiei intră obiectele stelare care populează diagrama H—R: stelele de pe secvența principală,

stelele pitice, gigantele și supergigantele (vezi figura 1.5). În plus, în structura Galaxiei mai intră stelele duble și multiple, roiurile stelare, stelele variabile precum și materia interstelară.

i) Stelele duble pot fi vizuale optic și vizuale fizic. O stea dublă optic este „alcătuită" din două stele „componente" care, aparent, sînt situate (proiectate) foarte aproape una de alta. În realitate, componentele respective pot să se găsească în spațiu, la mare distanță una de alta, dublarea observată fiind un fenomen aparent datorat perspectivei, cele două stele componente neinfluențîndu-se una pe alta.

Dacă componentele unei stele duble sînt situate în spațiu la mică depărtare una de alta și, din punct de vedere gravitațional, se influențează reciproc, avem de-a face cu o *stea dublă fizic*. În mod analog se pot defini și stelele triple sau multiple.

Dacă pe bolta cerească se observă un număr mai mare de stele care sînt apropiate între ele, formațiunea respectivă se numește *roi de stele* sau *roi stelar*. Un astfel de roi se prezintă vederii noastre ca o „pată" luminoasă, iar după aspectul lor putem deosebi *roiuri deschise* sau *dispersate* și *roiuri globulare* sau *sferice*. Distribuția acestora se încadrează în limitele dimensiunilor Galaxiei, fapt care dovedește că ele fac parte din sistemul nostru stelar.

Pentru roiurile dispersate este greu de închipuit o formă geometrică bine conturată; ele pot avea forme neregulate din cauza distribuției întîmplătoare a stelelor din interiorul lor. Ca exemple de astfel de formațiuni amintim: Pleiadele, Hyadele, Praesepele etc.

Roiurile sferice sau globulare sînt aglomerări de sute și mii de stele care, în regiunea centrală, sînt atît de aglomerate încît imaginile stelare se contopesc, stelele ne mai putînd fi distinse în mod separat. Astfel de roiuri nu se pot „descompune" în stele.

ii) *Stelele variabile* reprezintă acel grup de stele la care s-a observat cel puțin un parametru variabil în timp. Inițial a fost vorba de strălucirile corespunzătoare. Desigur, privite cu atenție, s-ar părea că toate stelele au străluciri variabile, dar la definiția unei astfel de stele nu se iau în con-

siderare variațiile cauzate de absorbția luminii prin atmosfera terestră.

Dacă ne fixăm atenția asupra unei regiuni a bolții cerești și notăm pe hîrtie stelele respective în ordinea creșterii sau descreșterii strălucirilor corespunzătoare, după o privire mai îndelungată putem constata că o anumită stea ar fi nonconformistă și nu-și păstrează poziția în secvența stabilită. Strălucirea unei astfel de stele ar putea avea fluctuații în raport cu strălucirile celorlalte stele; de aici denumirea de *stea variabilă*. Reprezentarea grafică a strălucirii în funcție de timp determină așa-numita *curbă de lumină*.

Odată cu aprofundarea cercetării stelelor variabile a crescut considerabil numărul de obiecte din această grupă și s-a impus necesitatea unei notații speciale. Astfel, la început s-au utilizat notațiile cunoscute pentru desemnarea stelelor dintr-o constelație: β Persei, β Lyrae etc.

Pentru stelele variabile mai slabe, care nu erau trecute pe atlasele cerești, s-au utilizat literele majuscule latine. Astfel, prima stea variabilă descoperită într-o constelație este notată cu R (R Aquilae = steaua R din constelația Vulturul). Următoarea stea variabilă din constelația respectivă are notația S Aquilae și așa mai departe pînă la Z. Apoi, pentru stelele variabile descoperite în aceeași constelație se utilizează combinațiile de cîte două litere: RR, RS, ..., RZ, SS, ST, ... SZ și așa mai departe pînă la ZZ (ZZ Cygni = steaua ZZ din constelația Lebăda).

Dacă, după utilizarea acestor 54 de combinații, într-o constelație se descoperă noi stele variabile, se utilizează combinațiile AA, AB, ... AZ, BB, BC, ..., BZ și așa mai departe pînă la QZ. Litera J nu a fost inclusă aici pentru a evita eventuala confuzie cu litera I. Prin urmare, utilizînd toate combinațiile de mai sus putem desemna un număr de 334 stele variabile într-o constelație.

Mai departe, dacă combinațiile de mai sus nu sînt suficiente, pentru notarea celorlalte stele variabile se folosește notația V (variabila) urmată de numerele care succed lui 334, adică V_{335} V_{336} et . După QZ Cygni urmează V_{335} Cygni.

Și în cadrul stelelor variabile aparența și realitatea pe bolta cerească sînt două noțiuni frecvent întîlnite. Astfel, unele stele își schimbă strălucirea ca urmare a anumitor

procese fizice care se derulează în interiorul stelelor sau în atmosferele respective. Pe acestea le numim *stele variabile intrinseci*. În alte cazuri avem de-a face cu variații care pot fi determinate de pozițiile stelei în raport cu observatorul. Este vorba de așa-numitele stele variabile aparente — stele pseudo-variabile, printre care amintim:

— *Stelele elipsoidale* care, din cauza rotației axiale, prezintă observatorului suprafețe aparent variabile.

— *Stelele duble fotometrice* ale căror componente se eclipsează reciproc, fapt pentru care la observator ajunge strălucire variabilă.

Considerăm potrivit să specificăm aici și faptul că prin existența stelelor duble se pot explica multe fenomene observate și în astronomia invizibilului. O contribuție importantă au aici suprafețele echipotențiale în interiorul cărora sînt „scufundate“ stelele componente.

Din considerațiile de mecanică cerească privind problema restrînsă a trei corpuri, potențialul (gravitațional + de rotație), Ω, este exprimat prin relația:

$$\Omega=\frac{1}{1+q}\frac{1}{r_1}+\frac{q}{1+q}\left(\frac{1}{r_2}-x\right)+\frac{1}{2}(x^2+y^2), \qquad (1.25)$$

unde $q=\mathfrak{M}_2/\mathfrak{M}_1$ este raportul maselor stelelor componente iar semnificația lui x, y, r_1 și r_2 este indicată pe figura 1.9. Aici P este o particulă materială de masă neglijabilă în raport cu cele două mase stelare $\mathfrak{M}_1$ și $\mathfrak{M}_2$.

Sistemul de axe $\mathfrak{M}_1$ x, y, z este ales astfel încît $\mathfrak{M}_1x$ trece tot timpul prin dreapta $\mathfrak{M}_1$ $\mathfrak{M}_2$; $\mathfrak{M}_1y$ este în planul orbitei stelei $\mathfrak{M}_2$ iar $\mathfrak{M}_1$ z este perpendicular pe planul $\mathfrak{M}_1xy$ și reprezintă axa de rotație a sistemului $\mathfrak{M}xy$.

Distanțele dintre $\mathfrak{M}_1$ $\mathfrak{M}_2$ și particula P au expresiile:

$$r_1^2=x^2+y^2+z^2;\ r_2^2=(x-1)^2+y^2+z^2, \qquad (1.26)$$

unde distanța $\mathfrak{M}_1$ $\mathfrak{M}_2$ este considerată ca unitate de lungime ($a=1$).

Ecuația (1.25) arată că potențialul Ω este funcție de raportul maselor q. Locul geometric pentru Ω = const. reprezintă așa-numita suprafață echipotențială a cărei intersecție cu planul $z=0$ determină o curbă echipotențială situată în planul orbitei lui $\mathfrak{M}_2$. În figura 1.10 sînt prezentate curbele

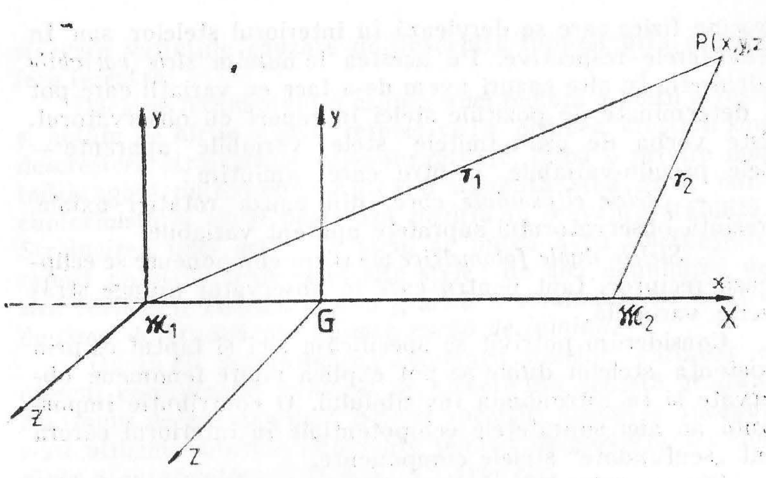


Fig. 1.9. Sistemul de coordonate utilizate în problema restrînsă a celor trei corpuri.

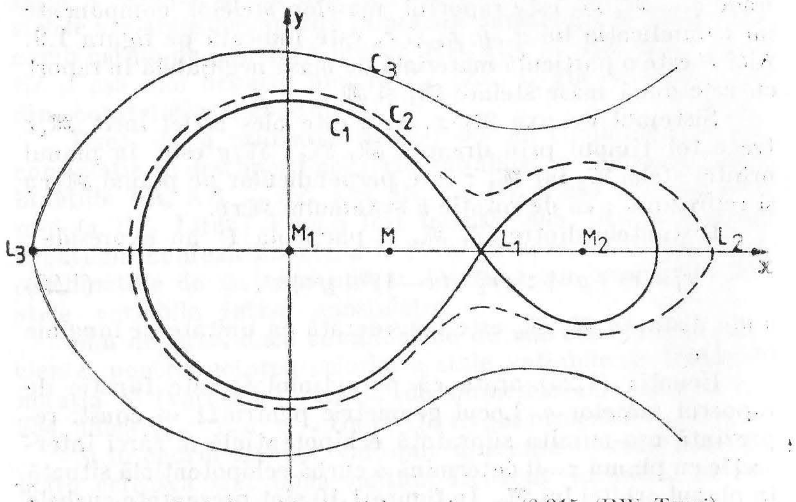


Fig. 1.10. Curbele echipotenţiale pentru q=0,215 (RW Tauri).

echipotenţiale C_1, C_2 şi C_3 pentru $q = 0.215$ (RW Tauri). De aici se vede că prima curbă echipotenţială cuprinde cele două stele componente în interiorul lobilor corespunzători — lobii Roche. Punctul L_1 este locul unde curba C_1 taie de două ori axa $\mathfrak{M}_1 x$, el se numeşte primul punct de libraţie — primul punct Lagrange. Cel de al doilea punct Lagrange, L_2 se găseşte pe axa pozitivă $\mathfrak{M}_1 x$, situat dincolo de $\mathfrak{M}_2$. Al treilea punct de libraţie, L_3, se află pe axa negativă $\mathfrak{M}_1 x$.

iii) *Stele nove şi supernove.* Datele observaţionale şi consideraţiile teoretice au arătat că *novele* reprezintă o categorie de stele variabile care se caracterizează printr-o creştere bruscă a luminozităţii şi, prin aceasta, o mărime considerabilă a strălucirii. Luminozitatea novelor devine de circa 100 000 de ori mai mare decît aceea a Soarelui, iar creşterea bruscă a acesteia dă impresia apariţiei unei stele noi, de unde şi denumirea de *nouă*.

În timpul desfăşurării fenomenului de nouă strălucirea unei stele creşte cu vreo 13 magnitudini, fapt pentru care astfel de obiecte se pot observa şi cu instrumente mici. Observarea novelor în domeniile spectrale invizibile este deosebit de importantă pentru construirea de modele privind fizica şi evoluţia stelelor.

În cursul unei erupţii, o nouă eliberează o cantitate de energie de $10^{44}-10^{45}$ ergi.

Pentru notarea novelor se utilizează cuvîntul Nouă urmat de numele constelaţiei (la cazul genitiv) în care a avut loc apariţia respectivă, după care se scrie anul corespunzător. Astfel *Nova Aquilae* 1918 reprezintă steaua care a erupt în anul 1918 în constelaţia Aquila.

Atunci cînd erupţiile unor stele sînt mult mai puternice decît acele care determină fenomenul de nouă, avem de-a face cu un fenomen în care luminozitatea stelei creşte şi mai mult. Este vorba de aşa-numitele supernove, fenomenul respectiv datorîndu-se unora dintre cele mai violente explozii cunoscute în Univers.

La maximul de strălucire, o supernovă poate emite atîta energie cît emit, în condiţii normale, toate stelele din Galaxie. Supernova din Galaxia noastră care a explodat în anul 1054 din era noastră, în constelaţia Taurus, a avut la maximul de strălucire magnitudinea aparentă $m_{max} = -5$ şi a fost vizibilă

cu ochiul liber în timpul zilei. Rămășițele acestei supernove sînt cunoscute astăzi sub denumirea de *Nebuloasa Crab*. Aceasta este unul dintre cele mai interesante obiecte galactice de pe bolta cerească și a fost observată la toate lungimile de undă.

La maximul de strălucire supernovele ajung pînă la magnitudinea absolută $M = -21$, fapt pentru care astfel de obiecte pot fi observate cu multă ușurință chiar și atunci cînd sînt situate la distanțe ce depășesc cu mult limitele Galaxiei noastre.

Din cercetările efectuate asupra regiunilor în care s-au înregistrat explozii de supernove rezultă că acolo se mai găsesc anumite resturi ale acestora — relicve ale obiectelor cosmice care au explodat. În Galaxia noastră astfel de relicve se cunosc în constelațiile Taurus și Vela. În restul de supernovă din Taurus — Nebuloasa Crab — s-a pus în evidență prezența unui pulsar radio, sursă care emite energie radio sub formă de impulsuri foarte regulate. Vom reveni asupra unor obiecte de acest fel.

iv) *Nebuloasele galactice* sînt obiecte care, în nopțile senine și fără Lună, se prezintă cu aspect nebular, oricît de puternic ar fi telescopul utilizat. Aceste obiecte, precum și cele care cu lunete puternice se pot descompune în stele (roiuri de stele), au produs multă bătaie de cap astronomilor care se ocupau de căutarea cometelor. De aceea, pentru ușurarea muncii de identificare a cometelor, în anul 1784, astronomul francez Charles J. Messier (1730 — 1817) a întocmit un catalog al tuturor obiectelor cu aspect nebular, observabile în epoca respectivă. În acest catalog, care conținea aproape 100 de obiecte nebulare, obiectul nr. 1 era chiar Nebuloasa Crab, astăzi fiind cunoscută sub notația Messier 1 sau M1. Roiul stelar globular din constelația Hercules are notația M13, iar Marea Nebuloasă din Andromeda este notată prin M31.

Cu timpul au fost descoperite noi obiecte nebulare, fapt care a dus la necesitatea întocmirii unui catalog mai cuprinzător. Astfel, astronomul J.L.E. Dreyer (1852 — 1926), în anul 1888, publică catalogul cunoscut sub denumirea NGC (New General Catalogue) care conține 7 840 obiecte, Nebuloasa Crab avînd aici notația NGC 1952, iar roiul din Hercules este marcat prin NGC 6 205 etc. Ulterior (1895 — 1906) au fost publicate două suplimente ale catalogului NGC, suplimente cunoscute prin notația IC (Index Catalogue) care mai conțin cîteva mii de obiecte cu aspect nebular.

Asupra problemei cataloagelor vom reveni, datele observaționale fiind atît de numeroase încît aproape fiecare observator orbital și-a întocmit catalogul propriu.

Revenind acum la nebuloasele galactice, trebuie să specificăm faptul că ele reprezintă mari aglomerări de materie interstelară. După aspectul lor deosebim următoarele tipuri de nebuloase galactice: nebuloase luminoase cu emisie de energie, nebuloase luminoase cu reflexie, nebuloase obscure și nebuloase planetare.

Nebuloasele planetare se numesc astfel din cauza asemănării lor cu imaginile discurilor aparente ale planetelor. De fapt, aici este vorba de o enormă masă de gaz în interiorul căreia se găsește o stea de tipul Wolf-Rayet (tipul spectral W). Se presupune că învelișul gazos ar fi fost ejectat, cîndva, din interiorul stelei respective. În general, stelele din interiorul nebuloaselor planetare sînt foarte fierbinți, cea mai mare parte din energie fiind emisă în domeniul ultraviolet.

Repartiția nebuloaselor planetare pe bolta cerească arată că ele au o concentrare puternică spre planul galactic. Se apreciază că în Galaxie ar exista vreo 50 de mii de astfel de obiecte.

1.9. Elemente de astronomie extragalactică

Rămînînd în cadrul obiectelor cu aspect nebular, amintim aici faptul că, privite prin telescop, unele nebuloase se pot descompune în stelele componente, iar depărtarea acestora arată că ele sînt situate cu mult dincolo de limitele Galaxiei noastre. Astfel de obiecte au fost numite, la început, nebuloase extragalactice, iar mai tîrziu, după ce s-a constatat că este vorba de niște sisteme stelare asemănătoare cu Galaxia, au fost numite *galaxii*.

Din cauza distribuției spațiale și a distanțelor mari în raport cu dimensiunile lor, nebuloasele extragalactice au fost numite și *Insule în Univers*. Printre acestea amintim: Norul Mare al lui Magellan, Norul Mic al lui Magellan, galaxia

din Andromeda (NGC 24 = M31), galaxia din Triunghiul (NGC 598 = M33), galaxia din Ursa Major (NGC 3 031) etc.

În vederea stabilirii unor trăsături comune, astronomul american E. P. Hubble (1889 – 1953) a propus următoarea clasificare a galaxiilor: a) eliptice (E), b) spirale (S) și c) neregulate (Irr). Reproducem aici o schemă a clasificării lui Hubble.

$$E0 - E1 - \ldots - E7 \begin{array}{l} \diagup S_a - S_b - S_c \diagdown \\ \diagdown SB_a - SB_b - SG_c \diagup \end{array} Irr$$

a) În categoria galaxiilor *eliptice* sînt incluse acele sisteme stelare extragalactice care au forme sferice sau elipsoidale, pe bolta cerească acestea fiind văzute ca niște discuri rotunde sau turtite, pe care strălucirea descrește de la centru spre periferie. Ele conțin stele gigante roșii și galbene, pitice roșii și galbene și un număr de stele „albe" cu luminozitate foarte mare. Dimensiunile unor astfel de galaxii sînt cuprinse între 5 și 15 mii ani lumină, sînt sărace în materie interstelară, iar vîrsta lor este de peste 10 miliarde ani. După gradul de turtire (abaterea de la forma sferică), aceste galaxii se subîmpart în opt grupe: E0, E1, ... E7. În categoria galaxiilor eliptice intră circa 20% din cele cunoscute.

b) Galaxiile *spirale* au aspectul caracterizat prin prezența unor brațe care pornesc din nucleu și se înfășoară în jurul acestuia, indicînd astfel o mișcare furtunoasă – au caracteristici dinamice. Brațele spirale pot atinge dimensiuni de ordinul de mărime a 900 ani lumină în secțiune transversală. După gradul de dezvoltare al brațelor, Hubble consideră următoarele subclase:

i) Galaxii *spirale normale*, la care brațele emerg din poziții diametral opuse ale nucleului; pot să existe două sau mai multe brațe. Această subclasă este și ea divizată în trei grupe, după gradul de dezvoltare al spirelor și forma restrînsă a nucleului: S_a, S_b și S_c.

ii) Galaxii *spirale barate*, în care nucleul este atît de turtit încît se aseamănă cu o bară de la extremitățile căreia pornesc brațele spirale răsucindu-se în jurul nucleului. Pentru acest tip de galaxii se utilizează simbolul SB, iar gradul de dezvoltare al brațelor respective este marcat prin literele a, b și c.

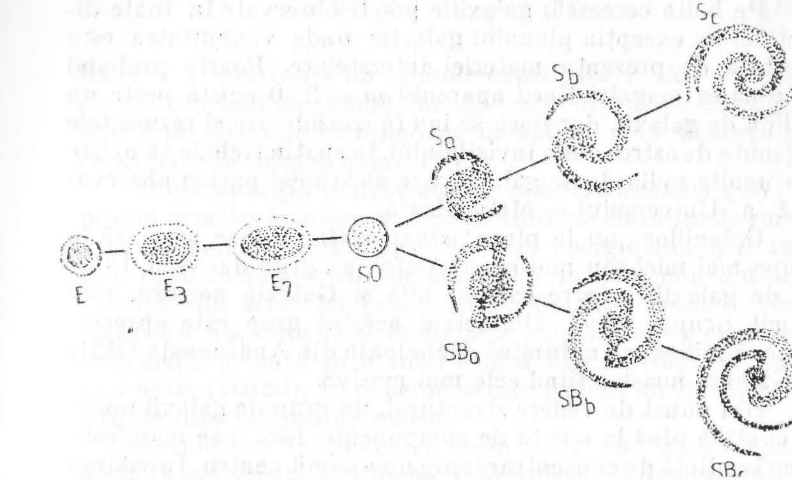


Fig. 1.11. Aspectul schematic al diferitelor tipuri de galaxii.

Galaxiile spirale sînt foarte numeroase, fiind aici cuprinse circa 77% din toate galaxiile cunoscute.

c) În fine, galaxiile neregulate cu simbolul Irr (irregular) sînt caracterizate prin lipsa unei forme bine definite. Printre acestea amintim Norii lui Magellan, în total aici fiind incluse vreo 3% din galaxiile cunoscute.

În figura 1.11 este prezentat aspectul schematic al tipurilor de galaxii.

După luminozitate, galaxiile se pot împărți în:

– galaxii supergigante cu magnitudinea absolută medie $M = -20{,}0$

– galaxii gigante luminoase, gigante și supergigante cu $M = -15{,}0$

– galaxii pitice cu $M = -13{,}0$.

Este vorba aici de niște magnitudini absolute medii; în realitate însă există o trecere continuă între grupele de galaxii. Există și galaxii care se abat considerabil de la cele trei clase menționate mai sus. Astfel, de exemplu, galaxia pitică descoperită de F. Zwicky în constelația Capricornus are $M = -6{,}5$, aceasta fiind mai puțin luminoasă chiar decît anumite roiuri stelare globulare.

Pe bolta cerească, galaxiile pot fi observate în toate direcțiile, cu excepția planului galactic unde vizibilitatea este afectată de prezența materiei interstelare. Foarte probabil că pînă la magnitudinea aparentă $m = 23,0$ există peste un milion de galaxii, dar dacă se iau în considerare și rezultatele obținute de astronomia invizibilului, în spațiu trebuie să existe mai multe miliarde de galaxii care alcătuiesc partea observabilă a Universului — Metagalaxia.

Galaxiilor „nu le place" *singurătatea*, ele se asociază în grupe mai mici sau mai mari. Astfel, un grup de vreo 19 — 20 de galaxii, printre care se află și Galaxia noastră, este numit *Grupul Local*. Diametrul acestui grup este apreciat la două milioane ani lumină, Nebuloasa din Andromeda (M31) și Galaxia noastră fiind cele mai masive.

Din punct de vedere structural, un grup de galaxii poate să conțină pînă la o sută de componente, fără a se manifesta vreo tendință de concentrare spre un anumit centru. În schimb pentru un grup de galaxii mult mai numeros și în care se evidențiază o concentrare centrală se utilizează noțiunea de *roi de galaxii*.

Cel mai apropiat roi de galaxii este *Roiul din Virgo*; se găsește la distanța de 36 milioane ani lumină, are diametrul liniar de 7,5 milioane ani lumină și conține vreo trei mii de galaxii.

Roiul care conține cele mai multe galaxii este cunoscut a fi Roiul din *Coma Berenices*; el are peste 11 000 de galaxii.

Există și roiuri de roiuri de galaxii — superroiurile de galaxii. Galaxia noastră face parte din superroiul al cărei centru este Roiul din Virgo; este vorba de *Superroiul de Galaxii din Virgo*.

Datele observaționale arată că galaxiile au spectre asemănătoare cu spectrele stelare, singura deosebire constînd în aceea că, în cazul galaxiilor liniile corespunzătoare sînt mult mai deplasate spre extremitatea roșie a domeniului vizibil. De aici s-a desprins ideea că, dacă deplasarea respectivă este interpretată ca un efect Doppler, toate galaxiile prezintă o mișcare de îndepărtare, o recesie, viteza de îndepărtare fiind cu atît mai mare, cu cît este mai mare distanța la care se află galaxia cercetată. Această descoperire a fost anunțată de Hubble în anul 1929 și se exprimă prin formula

$$v = H \cdot d = c\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = c \cdot z \qquad (1.27)$$

unde H = constanta lui Hubble exprimată în $km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}$, c = viteza luminii (km/s), iar $\Delta\lambda$ este deplasare Doppler a unei linii spectrale cu lungimea de undă λ. Aici distanța este exprimată în megaparseci (Mpc).

După apariția și dezvoltarea radioastronomiei (vezi capitolul următor) s-a convenit să se utilizeze noțiunea de *galaxii normale* pentru acele galaxii în care energia radiației radio este mică în raport cu energia emisă în domeniul optic. Ca exemplu de acest fel putem cita: Galaxia noastră, Nebuloasa din Andromeda și multe alte galaxii despre care avem informații primite prin intermediul observațiilor în domeniul optic (vizibil). În general, aceste galaxii au spectrele lipsite de linii intense de emisie.

Galaxiile care în domeniul radio emit mai multă energie decît în cel vizual se numesc *radiogalaxii*. Vom veni asupra acestora în capitolul următor.

Galaxiile care au linii strălucitoare de emisie în spectrul lor se numesc galaxii Seyfert. La prima vedere (prin telescop) o astfel de galaxie apare ca o stea luminoasă înconjurată de o aureolă slabă. Prin urmare, din punct de vedere morfologic, o galaxie Seyfert apare ca un nucleu, cu aspect stelar (nedescompus în stelele componente) înconjurat de o nebuloasă difuză. Prezența liniilor de emisie cu lărgime mare arată că galaxiile din această categorie conțin mult gaz cu un înalt grad de ionizare și care ar putea fi alcătuit din: neon, oxigen, sulf, fier, hidrogen și argon. Lărgimea liniilor spectrale reprezintă o dovadă a faptului că în interiorul nucleului ar exista curenți de materie — galaxii cu nuclee active.

După lărgimea liniilor de emisie se disting două clase de galaxii Seyfert, ale căror reprezentante sînt galaxiile NGC 5 548 și NGC 1 068. Vom reveni asupra acestora cu rezultatele obținute de astronomia invizibilului.

Un alt grup de obiecte extragalactice îl constituie *quasarii* care, deși au fost descoperiți prin intermediul radiotelescoapelor, prezintă caracteristici importante în toate domeniile spectrale. Este vorba de niște obiecte cu aspect stelar, dar care emit o enormă cantitate de energie. Deoarece primele

observații ale acestor obiecte au fost efectuate în domeniul radio, pentru denumirea lor s-a utilizat noțiunea de *radio-surse cvasistelare* (quasi-stellar radiosources), de unde a rezultat denumirea de *quasar*.

Din datele observaționale s-a stabilit că quasarii se pot caracteriza prin următoarele trăsături esențiale: 1) obiecte cu un nucleu luminos cu aspect stelar, 2) au exces de culoare în ultraviolet și uneori în infraroșu, în comparație cu stelele obișnuite, radiația caracteristică albastră fiind un indicator al prezenței radiației sincrotron, 3) fluxul de radiație este variabil în domeniile optic și radio, 4) au linii de emisie largi, cu mari deplasări spre roșu și linii înguste de absorbție; acestea din urmă, însă, nu se observă în toate cazurile.

În fine, pentru a termina cu enumerarea obiectelor extragalactice cunoscute, mai amintim aici grupa *lacertidelor*. Este vorba de niște obiecte de tipul „stelei variabile" BL Lacertae, care emit și în domeniul radio, dar au imaginile asemănătoare cu cele ale unor stele scufundate în niște nebulozități slabe. Nu au linii spectrale, sau se evidențiază cu mare greutate acolo unde există.

Capitolul 2

APARIȚIA ȘI DEZVOLTAREA RADIOASTRONOMIEI

Încă prin anul 1864, James Clerk Maxwell (1831—1879), unul dintre autorii teoriei cinetice a gazelor, elaborează o serie de cercetări cu privire la bazele teoretice ale electromagnetismului. Rezultatele respective prevedeau o extensiune considerabilă a spectrului electromagnetic, de o parte și de alta a domeniului optic. A fost prevăzută existența radiațiilor cu lungimi de undă mai mici și mai mari decît acele cunoscute pentru domeniul vizual.

Fizicianul german Heinrich Rudolf Hertz (1857—1894) a detectat, în anul 1888, radiații cu lungimi de undă de un milion de ori mai mari decît cele ale luminii „vizibile", radiații care au primit denumirea de *unde radio*.

Datorită conținutului scăzut de energie, undele radio s-au dovedit a fi ușor de reprodus și, în același timp, comod de recepționat. Aceste unde pot pătrunde prin diferite materiale care sînt opace pentru radiațiile din domeniul optic. Ele pot ricoșa în straturile atmosferei înalte, unde se găsesc particule cu sarcini electrice, fapt pentru care propagarea lor se poate efectua și paralel cu suprafața terestră.

Undele radio pot fi reproduse într-un mod coerent fără prea mari dificultăți, iar un fascicul concentrat al acestora poate parcurge distanțe foarte mari și poate fi modulat cu ușurință pentru utilizarea lui în transmisiuni de mesaje. Iată doar cîteva din cazurile care fac ca aceste unde să fie ideale pentru efectuarea unor comunicații la mari depărtări, fără a mai fi necesare cablurile greoaie și costisitoare de care se servește telegrafia prin fir.

Prima aplicație practică privind utilizarea undelor radio în transmiterea de informații a fost realizată de fizicianul italian Guglielmo Marconi (1874—1937). El a transmis, în

anul 1901, un semnal radio peste Oceanul Atlantic, moment considerat a coincide cu apariția *radiofoniei*.

În prima jumătate a secolului nostru, în urma dezvoltării puternice a radiofoniei și aplicarea acesteia la „ascultarea" corpurilor cerești, s-au pus bazele unei noi ramuri a astronomiei — *radioastronomia*.

2.1. Primele observații astronomice în domeniul undelor radio

De fapt, începutul radioastronomiei coincide cu momentul în care cercetătorul Karl Guthe Jansky (1905—1950) a descoperit o emisie radio de natură extraterestră. Este vorba de un eveniment care a jucat un rol deosebit de important în dezvoltarea ulterioară a astronomiei.

Născut în anul 1905, Karl G. Jansky a crescut în Midwest și a obținut diploma de fizician, la Universitatea din Wisconsin, în anul 1927. În anii următori lucrează în laboratoarele Companiei Bell Telephone, prima dată la Cliffwood și apoi la laboratorul Holmdel în New Jersey.

În activitatea sa, prima sarcină a lui Jansky era să cerceteze modul în care electricitatea statică afectează linia radiotelefonică transatlantică, inaugurată cu puțin timp mai înainte. Era vorba de cercetarea unor paraziți (zgomot de fond) care impiedicau dezvoltarea radiofoniei.

Utilizînd o antenă direcțională rotitoare și receptoare de construcție specială, în iarna lui 1931, Jansky constată că avea de-a face cu trei tipuri de electricitate statică, rezultatele respective publicîndu-le în anul 1932. Prima grupă de semnale electrice proveneau direct de la anumite furtuni ce se derulau în atmosfera terestră; erau descărcări electrice distrugătoare. Al doilea grup era alcătuit din semnale electrice slabe, provenind probabil de la trecerea tunetelor îndepărtae prin ionosferă. A treia grupă era caracterizată prin electricitate statică cu intensitate foarte slabă, dar de origine necunoscută. Această ultimă grupă era subiectul preocupărilor lui Jansky.

Urmărind zilnic direcția din care veneau semnalele cercetate de Jansky, s-a constatat că ele puteau fi asociate cu

poziția Soarelui pe bolta cerească. Era o concluzie foarte importantă, deși aceasta nu avea o valabilitate generală.

Din întîmplare, observațiile lui Jansky erau efectuate în timpul iernii cînd, în „mișcarea" sa anuală pe bolta cerească, Soarele se proiecta în constelația Sagittarius, direcție în care se proiectează și centrul Galaxiei noastre.

O dată cu trecerea timpului, pe măsură ce Soarele se „deplasa" pe bolta cerească, devenea tot mai clar faptul că semnalele descoperite de Jansky nu erau legate de astrul zilei. În plus, direcția semnalelor respective rămînea orientată constant spre constelația Sagittarius, motiv pentru care ele au fost asociate apoi de centrul Galaxiei, concluzie rămasă definitiv valabilă. Aceste rezultate Jansky le publică în anul 1933, dar în anul 1935 revine asupra lor arătînd că este vorba de surse radio discrete, a căror radiație este de natură termică — *bremsstrahlung*. Astăzi se știe că radiația detectată de Jansky este de natură sincrotron, emisă de electronii cu energii înalte și care spiralează în jurul liniilor de forță ale cîmpului electromagnetic galactic.

Din cauza tehnicii „rudimentare" utilizate la începutul istoriei radioastronomiei (1931), descoperirea surselor întinse de unde radio era mai ușoară decît aceea a surselor cu dimensiuni unghiulare mici. Această împrejurare a făcut posibilă descoperirea radiației radio de la centrul Galaxiei (1931) mai curînd decît aceea pe care o emite Soarele și care a fost descoperită abia prin 1944.

În ciuda interesului crescînd pe care-l manifestau astronomii față de descoperirea lui Jansky, cercetări de acest fel nu s-au bucurat de sprijinul cuvenit, rezultatele respective rămînînd doar simple curiozități, cu prea mică influență asupra altor cercetări.

Însuși Jansky s-a preocupat de alte probleme impuse de tehnica zilelor care au precedat cel de al doilea război mondial.

După război, Jansky s-a îmbolnăvit și moare la vîrsta de numai 45 ani, cînd radioastronomia devenea o disciplină importantă pentru cercetarea Universului.

În anul 1937, inginerul Grote Reber (n. 1911) a construit o instalație specială la poarta casei sale, o antenă cu oglindă parabolică cu diametrul de 9,5 m, cu ajutorul căreia, în anul

1938, recepționează radiații radio din diferite zone ale bolții cerești — se năștea astfel *radioastronomia*.

În decurs de cel puțin 10 ani, Reber a rămas singurul radioastronom din lume, dar un radioastronom amator. În anul 1944 el a încercat să obțină semnale radio de la galaxia din Andromeda, M 31, dar nu reușește.

Izbucnirea celui de al doilea război mondial a împiedicat dezvoltarea pe mai departe a radioastronomiei. Neavînd condiții materiale pentru efectuarea observațiilor cu caracter astronomic, cercetătorul olandez Hendrik Christoffell van de Hulst (n. 1918) a întreprins o serie de calcule care, în 1944, au dus la concluzia că atomii reci de hidrogen (hidrogenul neutru, H I) care se află în spațiul interstelar, pot suferi modificări în structura lor, modificări care să ducă la emisia spontană de fotoni în domeniul microundelor. Este vorba de descoperirea teoretică a radioliniei de la lungimea de undă $\lambda = 21$ cm (pe frecvența de 1 420 MHz).

Fiecare atom de hidrogen este supus unei modificări structurale la intervale foarte mari de timp. De aceea, ținînd seama de faptul că în spațiul interstelar există extrem de mulți atomi de hidrogen s-a ajuns la concluzia că radiolinia prevăzută teoretic are o mare probabilitate să fie detectată experimental. Și, într-adevăr, prezența ei a fost confirmată observațional de către fizicianul american Edward Mills Purcell (n. 1912) și colaboratorul său Harold I. Ewen.

Deoarece în spațiul interstelar predomină atomii de hidrogen, s-a tras concluzia că radiolinia de la $\lambda = 21$ cm trebuie să aibă un caracter universal, motiv pentru care, probabil, fizicienii Philip Morrison și Giuseppe Cocconi au considerat că pe această lungime de undă trebuie căutate semnalele transmise de alte civilizații cosmice.

Pentru recepționarea undelor radio de natură cosmică s-au construit radiotelescoape uriașe, dar de diferite tipuri. Radiațiile cu lungimi de undă centimetrice și milimetrice se recepționează prin intermediul radiotelescoapelor cu antene și oglinzi parabolice (vezi fig. 2.1). Oglinda de la radiotelescopul din Arecibo (Porto-Rico, S.U.A.) este o calotă sferică cu diametrul de 300 m. Pentru recepționarea radiațiilor cu lungimi de undă metrice și decametrice, radiotelescopul este bazat pe un cîmp de antene cuplate între ele.

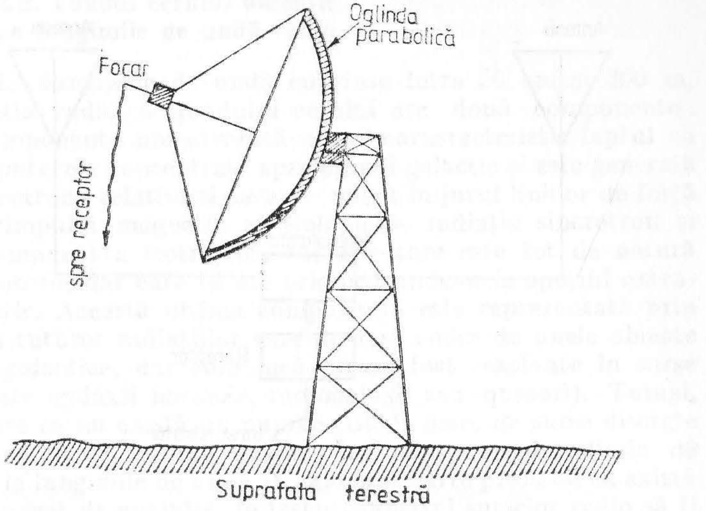


Fig. 2.1. Secțiune schematică printr-un radiotelescop.

În figura 2.2. este prezentată schema bloc a unui interferometru radioastronomic. Acesta permite să se determine cu mare precizie poziția surselor înregistrate.

Un interferometru radio este construit ca un radiotelescop cu două sau mai multe antene distincte, care sînt cuplate și lucrează ca o singură antenă, dar cu proprietăți de recepție impuse. Distanța dintre cele două antene — baza interferometrului — determină precizia cu care sînt localizate sursele observate.

Există radiointerferometre cu baze intercontinentale. Astfel, de exemplu, interferometrul cu baza între Australia și America de Nord sau cel cu baza între America de Nord și U.R.S.S. asigură o putere de separare — o rezoluție — de ordinul a 0,0002 secunde de arc.

Radiointerferometrele cu baze interplanetare vor asigura o precizie de milioane de ori mai mare decît aceea furnizată de radiointerferometrele terestre. Cu astfel de aparate se

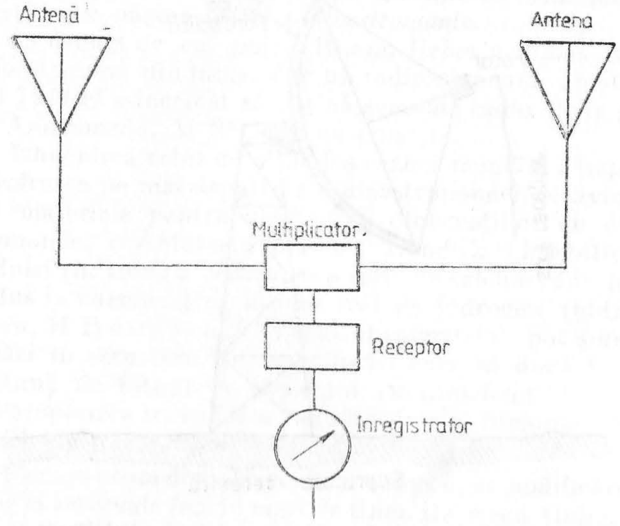


Fig. 2.2. Schema bloc a unui radiointerferometru.

speră că se vor putea recepţiona semnalele transmise de anumite civilizaţii cosmice, bineînţeles dacă ele există.

În radioastronomie, de obicei, avem de-a face cu fluxuri de energie cu densităţi foarte mici, motiv pentru care s-a introdus o unitate specială de măsură – Jansky – definită prin relaţia :

$$1 \text{ Jansky} = 1 \text{ unitate de flux} = 10^{-26} \frac{\text{watt}}{\text{m}^2\text{Hz}}.$$

Menţionăm că pentru recepţionarea semnalelor radio de la obiecte cosmice situate la mari depărtări de Pămînt, s-au stabilit intervale precise de lungimi de undă pe care sînt interzise transmiterile de semnale radio de natură terestră, aceasta pentru a evita prezenţa unor paraziţi suplimentari care ar putea perturba cercetările din această nouă ramură a astronomiei.

Prezentăm aici cîteva dintre cele mai importante rezultate obţinute de radioastronomie.

2.2. Fondul cerului observat pe lungimile de undă radio

La lungimile de undă cuprinse între 50 cm şi 300 m, radiaţia radio a fondului cerului are două componente : a) componenta anizotropică avînd caracteristic faptul că este puternic concentrată spre planul galactic şi este generată de electronii relativişti care se mişcă în jurul liniilor de forţă ale cîmpului magnetic al Galaxiei – radiaţie sincrotron şi b) componenta izotropică, radiaţie care este tot de natură sincrotron, dar care îşi are originea undeva în spaţiul extragalactic. Această ultimă componentă este reprezentată prin suma tuturor radiaţiilor care au fost emise de unele obiecte extragalactice, dar care încă nu au fost rezolvate în surse discrete (galaxii normale, radiogalaxii sau quasari). Totuşi, se pare că nu există un număr atît de mare de surse discrete care să poată asigura datele observate privind radiaţia de fond la lungimile de undă $\lambda > 50$ cm. Foarte probabil că există şi un efect de evoluţie, în trecut numărul surselor radio să fi fost mult mai mare. În acest caz, radiaţia recepţionată de la fondul cerului ar trebui să vină de la mari depărtări, ea trebuind să fi fost emisă cu mult timp în urmă.

Intensitatea spectrului radiaţiei de fond pentru $\lambda > 50$ cm descreşte o dată cu descreşterea lungimilor de undă şi nu este de natură termică. Totuşi, în domeniul spectral cuprins între 300 micrometri (microni) şi 50 cm intensitatea radiaţiei fondului extragalactic apare mult mărită şi are o distribuţie planckiană care corespunde la temperatura de 3 K. Aceasta este radiaţia relictă de la fazele timpurii ale Universului.

Utilizînd o antenă de construcţie specială, în anul 1964, Arno A. Penzias şi Robert W. Wilson au recepţionat radiaţia de fond în domeniul microundelor corespunzătoare unui corp negru cu temperatura de 2,7 *K*, considerată a proveni de la Marea Explozie (Big Bang) care ar fi constituit prima fază din evoluţia Universului nostru. Pentru acest rezultat, în anul 1978, cei doi cercetători au obţinut Premiul Nobel.

Peste fondul difuz de radiaţie radio se suprapune radiaţia care vine de la radiosursele compacte, acestea din urmă avînd o întindere de numai cîteva minute de arc, sau chiar mai puţin. La astfel de surse ne vom referi în cele ce urmează.

2.5. Observarea Soarelui în domeniul undelor radio

Dintre sursele radio discrete, Soarele a fost observat la începutul dezvoltării radioastronomiei. Totuși, în comparație cu alte domenii spectrale, în domeniul radio Soarele este o sursă relativ slabă, dar distanța mică la care se găsește acesta față de noi face posibilă înregistrarea fluxului radio corespunzător și cu aparate mai modeste. Iată de ce Soarele poate fi considerat ca o radiosursă bine cercetată.

Pentru prima dată radiația Soarelui a fost detectată în februarie 1942, prin intermediul radarelor de pe coasta oceanică a Angliei. La început s-a crezut că este vorba de o încercare de atac a armatelor germane, dar ulterior, prin cercetările efectuate de J. S. Hey, s-a dovedit că semnalele radio, atunci detectate, erau legate de prezența unui grup de pete pe suprafața Soarelui.

Cu certitudine, radiația radio a Soarelui a fost pusă în evidență în anul 1944, pe lungimea de undă $\lambda = 187$ cm. Foarte curînd după aceea s-au detectat radiații radio solare la lungimile de undă cuprinse între 8 și 12 mm. Prin urmare, cercetarea radio a Soarelui a fost inițiată înaintea anului 1950 și, prin aceasta, se puneau deja bazele tehnice și teoretice ale radioastronomiei.

Din observațiile efectuate cu ajutorul radiotelescoapelor s-a constatat că intensitatea radiațiilor respective este variabilă. Există perioade în care Soarele este „agitat" și radiază de milioane de ori mai multă energie decît în zilele de „calm". Soarele calm este o sursă de radiație termică, pe cînd radiația radio este emisă, în principal, de anumite condensări prezente în coroană. Radiația radio a Soarelui pe lungimile de undă metrice este emisă din coroana solară, pe cînd radiațiile cu lungimile de undă centimetrice sînt emise din cromosferă.

Radiația Soarelui calm are variații mici în timp, este vorba de o emisie cvasiconstantă, pe cînd Soarele agitat are variații radio cu oscilații puternice în timp. Aceste variații sînt corelate cu numărul de pete solare, de aceea, la un maxim al activității sale, Soarele devine o sursă agitată, radiația radio avînd particularități deosebite față de aceea a Soarelui calm.

Emisia Soarelui calm, pe lungimile de undă radio, se explică prin radiația termică a atmosferei solare, temperatura coroanei fiind de peste un milion de grade Kelvin, aici fiind vorba de temperatura cinetică a particulelor componente.

În timpul în care activitatea solară se intensifică, în special în cursul erupțiilor, temporar, atmosfera solară radiază fluxuri puternice de radiație nontermică. În timpul erupțiilor solare apar electroni cu energii înalte care, în urma procesului de accelerare, vor emite energie prin mecanismul sincrotron. Undele de plasmă își transformă o parte din energia lor în emisie de energie sub formă de radiație radio care, apoi, determină erupțiile sub formă de curenți lenți.

Erupțiile radio sînt foarte spectaculoase, mai ales pe lungimile de undă metrice, aici intensitatea radiației crescînd de circa o mie de ori în cîteva secunde, iar temperatura crește de la 10^6K pînă la $10^{11}-10^{12}$ K.

Pe lungimile de undă metrice fluxul fotonilor radio poate crește de un milion de ori sau chiar mai mult în decurs de numai cîteva secunde, pe cînd emisia în domeniul optic rămîne practic, constantă.

Observațiile efectuate pe lungimile de undă radio $\lambda =$ 1,9 cm; 2,5 cm și 3,5 cm au arătat că există o tendință de creștere a diametrului unghiular al discului solar, atunci cînd crește lungimea de undă. De asemenea, s-a stabilit o corelație între variația mărimii discului solar în raze radio și activitatea solară cunoscută prin observațiile efectuate în domeniul vizual (optic).

În timpul eclipsei de Soare din anul 1968, contactul dintre discul Soarelui în raze radio și discul lunar s-a produs cu aproximativ 75 secunde mai repede decît contactul respectiv în domeniul optic. Această constatare a dus la concluzia că diametrul solar în unde radio este de 1,03 ori mai mare decît diametrul corespunzător în domeniul optic. În schimb, la eclipsa din 1975, momentul contactului radio a coincis cu cel optic. De aici se desprinde concluzia că discul aparent radio al Soarelui nu este rotund, elipticitatea corespunzătoare fiind și ea dependentă de lungimea de undă la care se obțin datele observaționale. De altfel, în timpul eclipselor totale de Soare aspectul coroanei apare diferit de la o eclipsă la alta, emisia radio fiind dependentă de coroana respectivă

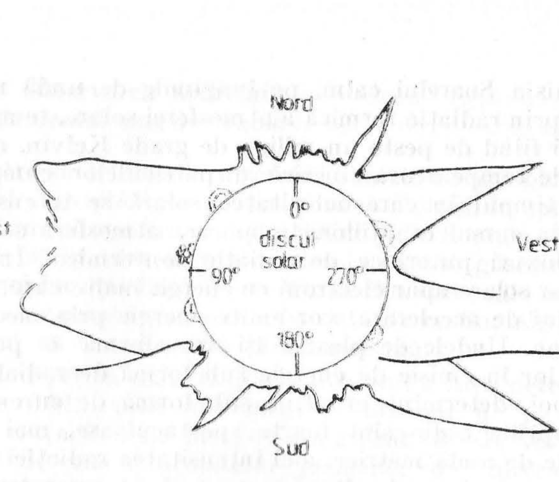


Fig. 2.3. Aspectul schematic al coroanei solare la data de 30 iunie 1973.

În figura 2.3 este prezentat aspectul coroanei solare la 30.06. 1973.

Dintre fenomenele solare, erupțiile sînt cele mai puternice surse de emisie radio. În astfel de cazuri intensitatea radiației solare radio devine de circa 10^5 ori mai mare decît intensitatea radiațiilor emise de Nebuloasa Crab și de aproximativ 10^8 ori mai mare decît intensitatea semnalelor recepționate de la unii quasari îndepărtați. Vom reveni asupra emisiei radio a acestor obiecte.

Energia totală eliberată în timpul unei puternice erupții solare este de ordinul a 10^{33} ergi, din care 10^{24} ergi este înregistrată în domeniul radio, restul fiind radiată în domeniile: roentgen, ultraviolet, optic și infraroșu.

În cursul unei erupții solare se produce o undă de șoc care, odată cu vîntul solar, se propagă spre suprafața Pămîntului cu viteza de circa 1 000 km/s și declanșează furtunile magnetice terestre. Și pentru acest motiv observarea Soarelui este deosebit de importantă, ea reprezintă un fel de școală pentru radioastronomii începători.

Analiza datelor observaționale arată că emisiile radio ale Soarelui sînt supuse unor fluctuații, fenomene asemănătoare fiind remarcate și în domeniul radiațiilor X tari, precum și în extremul violet.

2.4. Radioastronomia lunară

După cum se știe, Luna nu are lumină proprie. Totuși, datorită căldurii pe care o primește de la Soare, satelitul natural al Pămîntului nu este un obiect rece de tot. Temperatura Lunii este totuși foarte redusă, fapt pentru care energia radiată de aceasta se va putea înregistra numai cu aparate sensibile la radiațiile infraroșii sau în domeniul radioundelor.

Radiația radio a Lunii pe lungimea de undă $\lambda = 1{,}25$ cm a fost descoperită în anul 1946, iar temperatura corespunzătoare a fost găsită a fi de $+30°C$ ($= 303$ K) în cursul zilei lunare și de $-75°C$ în nopțile respective.

Observațiile radio pe lungimea de undă $\lambda = 3$ cm au arătat că temperatura corespunzătoare nu depinde de faza lunară. Temperatura astfel determinată are aceeași valoare atît pentru emisfera întunecată cît și pentru cea iluminată. Această situație se explică prin aceea că la suprafața Lunii se găsește un strat de praf cu o conductibilitate extrem de redusă. Ar fi vorba de praful meteoric, deoarece Luna neavînd atmosferă, căderea meteoriților aici este mult mai frecventă decît pe suprafața terestră. Prin urmare, Luna ar avea un fel de „învelitoare" care o apără atît împotriva căldurii solare, cît și împotriva frigului cosmic.

Pe lungimea de undă $\lambda = 4{,}3$ mm s-a pus în evidență o variație a strălucirii Lunii în funcție de faza corespunzătoare, dar s-a constatat că strălucirea respectivă are o rămînere în urmă față de faza optică. De aici, și avînd în vedere rezultatele amintite mai sus pentru $\lambda = 3$ cm, se trage concluzia că, prin observațiile radio la diferite lungimi de undă, s-ar putea determina grosimea stratului izolant de la suprafața Lunii.

Din analiza rezultatelor obținute prin observațiile radio, se ajunge la concluzia importantă că „mările" lunare se încălzesc și se răcesc mult mai repede în comparație cu regiunile „montane", Marea Imbrium apare ca o excepție față de această regulă ; tot timpul ea rămîne mai rece decît regiunile din vecinătatea sa, în cursul întregului ciclu lunar.

2.5. Radiațiile radio ale planetelor din sistemul solar

Planeta *Venus* a fost observată la lungimile de undă cuprinse între 0,1 cm și 70 cm. Rezultatele astfel obținute au arătat că temperatura emisferei neiluminate de Soare este de circa 600 K pentru 3 cm $< \lambda <$ 50 cm. Această temperatură surprinzător de mare, măsurată cu aparatele de pe Pămînt, a fost confirmată și prin măsurătorile efectuate cu aparatele de la bordul unor nave cosmice. Pentru $\lambda <$ 3 cm intensitatea radiației descrește din cauza absorbției prin atmosfera venusiană.

La lungimile de undă milimetrice și centimetrice, Venus este o sursă foarte strălucitoare, dar rămîne de vreo 100 de ori mai puțin strălucitoare decît Luna, pe cînd față de Soare este de vreo 10^4 ori mai slabă.

La începutul anilor '60, teoreticienii au prevăzut că *Pămîntul*, văzut de un observator situat undeva dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre, trebuie să se prezinte ca o puternică sursă de emisie radio. Această prevedere a fost confirmată observațional în anul 1964 cu aparatele de la bordul satelitului sovietic *Electron 2*. Apoi, în 1968, americanii lansează satelitul RAE 1 (Radio Astronomy Explorer) care, de la altitudinea de 6 000 km a înregistrat intense „erupții terestre" ce se găseau în strînsă corelație cu manifestarea aurorelor polare.

Tot în acest cadru mai amintim și faptul că satelitul RAE 2, mișcîndu-se în jurul Lunii, a observat ocultarea Pămîntului de către Lună. Cu această ocazie s-au detectat erupții terestre la frecvențele de 0,25; 0,36 și 0,48 MHz (= megahertzi).

În urma analizei rezultatelor amintite aici s-a ajuns la concluzia că erupțiile radio ale Pămîntului sînt asociate de regiunile de la mari latitudini (regiuni polare) unde particulele din razele cosmice, încărcate cu multă energie, intră în atmosfera terestră pentru a produce aurorele polare.

Pentru prima dată, pe lungimile de undă radio, planeta *Jupiter* a fost observată în anul 1955. Această planetă are o magnetosferă foarte întinsă și intensă, fapt pentru care era de așteptat să aibă o importantă emisie de radiație radio.

Din cauza unor furtuni magnetice puternice care își au sediul în magnetosfera lui Jupiter, strălucirea radio este supusă la variații deosebit de mari. Uneori în domeniul radio, această planetă devine mai luminoasă chiar decît Soarele.

Observații pe lungimile de undă de 3 cm și 4 cm au indicat prezența temperaturilor de corp negru de 145 K și respectiv 200 K, în timp ce la lungimile de undă cuprinse între 10,3 cm și 10,2 cm a rezultat temperatura de 600 K, o valoare neobișnuit de mare pentru astfel de temperaturi. Și aici se pune în evidență variabilitatea radiației înregistrate.

Măsurătorile efectuate la lungimile de undă cuprinse între 21 cm și 68 cm au arătat că densitatea fluxului de radiație se menține constantă. Au fost determinate temperaturile de 2 500 K pentru λ = 21 cm și 5 000 K pentru λ = 68 cm. În plus, observațiile efectuate la lungimea de undă λ = 31 cm prezintă o polarizare liniară de circa 31%, cu vectorul electric aproape paralel cu ecuatorul lui Jupiter, emisia respectivă provenind de la o regiune de vreo trei ori mai întinsă decît discul optic al planetei.

Pe discul aparent al planetei Jupiter există mai multe „pete" cu ajutorul cărora s-a putut determina cu precizie „bună" perioada de rotație axială. Măsurătorile efectuate de către radioastronomi, în anul 1962, au stabilit, pentru interiorul acestei planete, perioada de rotație de $9^h55^m29,37^s$.

Pentru explicarea mecanismului prin care se produce emisia radio a planetei Jupiter au fost elaborate mai multe modele teoretice. Se presupune că radiația pe lungimile de undă centimetrice este de natură sincroton sau ciclotron, determinată de electronii cu energii mari, de origine solară, care au fost prinși în „capcana" cîmpului magnetic corespunzător. Această ipoteză, deși greu de acceptat, este în acord cu observarea direcției vectorului electric la lumina polarizată.

În cazul planetei *Saturn*, pe discul aparent se observă mai puține detalii, fapt care face ca perioada de rotație axială a acesteia să fie mai greu de determinat. Astfel, observarea, în anul 1960, a unei pete situate la latitudine mare a dus la perioada de rotație axială de $10^h39,8^m$; pe cînd observarea unei pete ecuatoriale, în 1946, a furnizat $P_{rot} = 10^h21,4^m$. Din rezultatele furnizate de nava Voyager s-a obținut $P_{rot} = 10^h39,39^m$.

Cercetările radio ale planetei Saturn sînt mai dificile decît în cazul lui Jupiter deoarece semnalul emis este mult mai slab și, în plus, aici pot exista perturbații importante provocate atît de Soare cît și de Jupiter.

Radioastronomii au detectat un semnal radio provenind de la Saturn și s-a stabilit un „puls" radio cu perioada de $10^h39,4^m$. Natura acestui puls ar fi ușor de explicat dacă și aici ar exista un cîmp magnetic puternic, dar navele Pioneer și Voyager nu au semnalat așa ceva. De aceea, „pulsul" observat în domeniul radio rămîne o enigmă. Foarte probabil să existe un cîmp magnetic rotitor, care ar aparține nucleului solid al lui Saturn.

Celelalte planete emit radiații radio în mod asemănător cu sursele termice normale.

2.6. Surse de radiații radio în Galaxie

Pînă prin anul 1950 se cunoșteau deja vreo 50 de surse radio, dar dintre acestea numai unele aveau corespondentul optic cunoscut. În anul 1951 s-au înregistrat sursele radio puternice: Cassiopeia-A și Cygnus-A, iar în anul 1953 se stabilește faptul că dintre sursele radio cunoscute unele aparțin Galaxiei, pe cînd altele sînt de natură extragalactică.

a) *Radiostelele* sînt stele active în domeniul radio și fac parte din Galaxie. Este vorba de acele stele la suprafața cărora există condiții de emisie a radiației nontermice, eventual niște erupții asemănătoare cu erupțiile solare. În astfel de cazuri intensitatea radiației emise ar putea să fie de vreo 10^9 ori mai mare decît aceea observată la Soare, rezultat care s-a obținut prin tratarea unitară a observațiilor furnizate atît de radioastronomie cît și de astronomia optică.

Nu demult, marile radiotelescoape au detectat emisie de unde radio la mai multe stele gigante roșii (Betelgeuse), companioni albaștri din anumite stele duble (Antares, Algol, β Lyrae) și anumiți curenți de materie care se scurg între stelele componente ale unor sisteme duble fotometrice. Nu toate sistemele de stele duble sînt active în domeniul radio.

Observarea stelelor *nove* a arătat că și acestea sînt emițători puternici de radiații în domeniul radio. După erupțiile stelelor Nova Delphini 1967 și Nova Serpentis 1970 s-a constatat că emisiile lor în domeniul radio au scăzut constant în intensitate, fapt care arată că radiația respectivă provenea de la plasma ejectată în cursul exploziei fenomenului de novă.

Supernovele și resturile de supernove sînt și ele surse puternice de unde radio. Este vorba aici de acele explozii considerabile prin care enorme cantități de gaz incandescent sînt aruncate în spațiu; nori care sînt surse remarcabile de emisie în domeniul radio. În mileniul nostru au fost observate, în Galaxia noastră, trei fenomene de acest fel: Nebuloasa Crab în 1054, supernova lui Tycho în 1572 și supernova lui Kepler în 1604. Dintre toate acestea, Nebuloasa Crab este cea mai puternică și are emisie de energie în toate domeniile spectrale.

Afară de cazurile amintite mai sus, mai există stele care, deși au importante emisii de energie în alte domenii spectrale, emit o cantitate apreciabilă de energie și în domeniul radio. Astfel, de exemplu, sursa de radiații X cunoscută sub notația *Scorpius X-1* are harta radio asemănătoare cu aceea a radiogalaxiilor multiple. Aceasta este o sursă radio foarte variabilă, intensitatea ei putînd să crească sau să descrească de vreo 60 de ori în cursul unei zile.

Analiza observațiilor radio duce la concluzia că în centrul lui Scorpius X-1 există un obiect compact, de o parte și de alta a acestuia găsindu-se două componente extinse. Avem de-a face cu o sursă radio triplă a cărei structură este constantă în timp, dar care se aseamănă cu radiosursele extragalactice. Această asemănare este susținută și prin prezența altor caracteristici spectrale. Deosebirea dintre Scorpius X-1 și sursele radio extragalactice constă numai în ordinul de mărime al emisiei de energie și al dimensiunilor corespunzătoare.

Radiație radio s-a înregistrat și de la sursa *Cygnus X-3*, care nu este vizibilă în domeniul optic; astăzi se știe că aceasta are o bogată activitate care se manifestă printr-o serie de erupții violente. Se găsește la circa 11 000 pc (parseci) de noi.

Printre sursele radio galactice putem întîlni și unele nebuloase, deosebit de importante fiind aici formațiunile cunoscute sub denumirea de *nori de hidrogen*. Radiația radio a acestora este de natură termică, intensitatea fluxului de energie radiată scăzînd atunci cînd crește lungimea de undă a domeniului în care se efectuează observațiile.

b) *Observarea pulsarilor radio*

Începînd cu anul 1964, la laboratorul Cavendish al Universității din Cambridge (Anglia), sub conducerea lui Anthony Hewish (n. 1924), se efectuau observații radio pentru cercetarea scintilațiilor produse de mediul interplanetar asupra radiației care vine de la obiectele cosmice îndepărtate. Astfel, încercînd să determine perioadele de scintilație ale radiației care vine de la obiecte situate la diferite distanțe unghiulare față de coroana solară, utilizînd o tehnică specială, observațional s-a pus în evidență existența unor surse de radiație radio, manifestările acestora fiind independente de poziția Soarelui pe bolta cerească. Era o descoperire interesantă care a trezit curiozitate în rîndul cercetătorilor, observații ulterioare de mare precizie venind să stabilească natura cosmică a surselor respective.

Din analiza rezultatelor observaționale obținute în luna august 1967, cît și cele de verificare din luna noiembrie a aceluiași an, doctoranda Jocelyn Bell-Burnell, de la Universitatea din Cambridge, a pus în evidență existența unei surse radio cu luminozitate slabă, dar variabilă. Semnalele înregistrate de la această sursă se repetau după o perioadă scurtă, dar nemaipomenit de precisă. Au fost înregistrate impulsuri radio foarte scurte, dar care se repetau după o perioadă de o secundă. Aceste pulsuri aveau amplitudini diferite.

Fluctuațiile foarte rapide ale radiației radio ale surselor nou descoperite erau numite pulsuri de la cuvîntul englez pulse (= impuls), iar pentru corpurile cărora le aparțineau pulsurile respective s-a utilizat denumirea de *pulsar*.

La începutul cercetărilor amintite mai sus era cunoscut un singur pulsar și avea notația CP 1919 (Cambridge Pulsating Source) care, pe bolta cerească se proiectează în constelația Vulpecula, la ascensia dreaptă $\alpha = 19^h 19^m$.

Observațiile radio arătau că fiecare puls avea o creștere abruptă, revenirea de la maxim spre minim efectuîndu-se în mai puțin de trei milisecunde (0,003 s).

Pentru pulsarul CP 1919, durata generală a unui puls este de vreo 37 milisecunde, iar intervalul dintre diferitele pulsuri consecutive era același, chiar și atunci cînd era vorba de observații la lungimi de undă diferite.

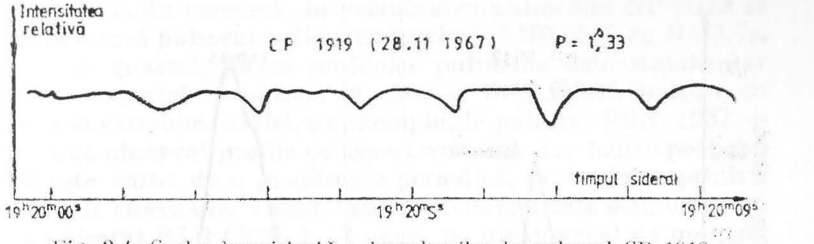


Fig. 2.4. Curba înregistrată a impulsurilor la pulsarul CP 1919.

În timpul cît durează un puls intensitatea radiației variază foarte repede, iar forma curbei impulsurilor individuale este diferită, fapt care arată că un impuls putea să aibă amplitudini diferite în cicluri diferite. O astfel de variație se repetă cu o perioadă cuprinsă între o fracțiune de secundă și cîteva luni. În figura 2.4 este reprodusă curba impulsurilor la pulsarul CP 1919.

La poziția pulsarului CP 1919 a fost identificată o stea albastră de magnitudine $m = 18$, dar pentru dimensiunile acestui obiect s-au obținut valori mai mici decît acele ale planetei Mercur. Obiectul respectiv este situat la circa 200 ani lumină.

În anul 1969 se cunoșteau deja vreo 40 de pulsari cu perioadele cuprinse între 0,033 și 4 secunde; în 1987 se cunoșteau peste 500 de pulsari radio, iar în prezent numărul acestora este mult mai mare.

Așadar, pulsarii radio sînt surse de radiație radio, emisia respectivă fiind caracterizată prin impulsuri separate care se repetă după un anumit interval de timp numit perioadă, valoarea acesteia putînd fi determinată cu foarte mare precizie. Astfel, pulsarul CP 1919 are perioada $P = 1{,}33730113$ secunde și este determinată cu o precizie de o unitate la ultima zecimală, pe cînd pulsarul cu notația PSR 0835-45 ($\alpha = 8^h 35^m$, $\delta = -45°$), care se găsește pe același loc cu restul de supernovă din constelația Vela, are $P = 0{,}089$ secunde[1].

[1] Pentru notarea pulsarilor se folosesc literele PSR (prescurtare de la cuvîntul englez „pulsar"); primele patru cifre, scrise în continuare, indică ascensia dreaptă în ore și minute, iar următoarele două cifre reprezintă declinația.

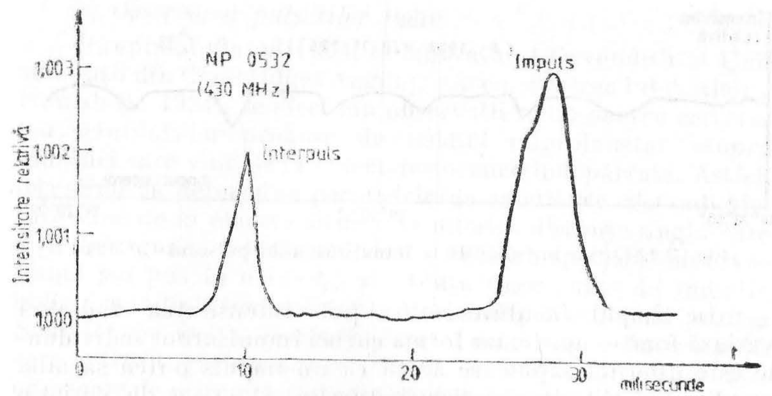


Fig. 2.5. Curba de lumină a Pulsarului Crab (NP 0532) la frecvenţa 430 MHz

Pulsarul din Nebuloasa Crab, care coincide cu restul supernovei din 1054, a fost înregistrat în domeniul radio în noiembrie 1968. Pentru acesta se utilizează notaţia NP0532 şi are perioada $P=1/3$ s. Observaţiile arată că perioada acestui pulsar creşte cu 38 miliardimi de secundă pe zi. În figurile 2.5 şi 2.6 sînt prezentate curbele de lumină ale Pulsarului Crab în domeniile radio şi respectiv optic.

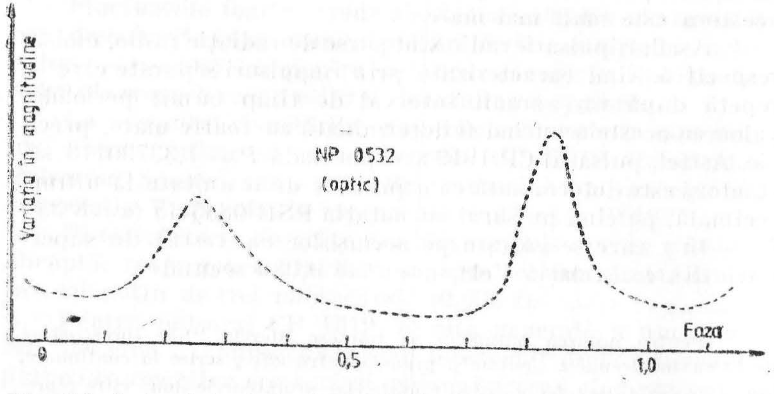


Fig. 2.6. Curba de lumină a Pulsarului Crab în domeniul optic.

Pe bolta cerească, în vecinătatea pulsarului NP 0532 se proiectează pulsarul radio „lungperiodic" NP 0525 cu $P=3,7$s.

În general, forma profilelor pulsurilor este stabilă dar s-au constatat şi pulsari la care se evidenţiază pulsuri cu profile variabile. Astfel, de exemplu, la pulsarul PSR 1237 + 25 s-au observat profile cu aspect variabil, dar foarte probabil că este vorba de o modificare periodică, perioada respectivă fiind de cîteva ore. Variaţii mult mai complicate s-au observat la pulsarul PSR 0329 + 54 unde, pe un interval de opt ani, s-au pus în evidenţă oscilaţii periodice cu un ciclu de aproximativ trei ani.

Identificarea pulsarului din Nebuloasa Crab cu o stea neutronică, rezultată din explozia supernovei din anul 1054, a condus la ipoteza că pulsarii trebuie să fie legaţi de resturile de supernove. În favoarea acestei ipoteze vine şi identificarea dintre pulsarul din Vela, PSR 0835-45, şi steaua HD77581. Totuşi, deocamdată astfel de observaţii nu confirmă pe deplin presupunerea respectivă. Există multe resturi de supernove la care nu se observă pulsari. În orice caz, descoperirea pulsarilor şi stabilirea legăturii dintre ei şi stelele neutronice reprezintă un salt emoţionant în cercetarea celor mai ipotetice obiecte cosmice prevăzute teoretic — *stelele neutronice*.

Mult timp pulsarul din Nebuloasa Crab era considerat ca avînd cea mai scurtă perioadă, un pulsar rapid. Dar la începutul anilor '80 recordul respectiv a fost depăşit. În constelaţia Vulpecula s-a descoperit pulsarul PSR 1937 + 215 care efectuează 642 de rotaţii într-o secundă ; are perioada $P =$ 1,557806449022 milisecunde. Este un pulsar de 20 de ori mai rapid decît acela din Nebuloasa Crab. Se apreciază depărtarea lui la 8 000 ani lumină. Se pare că este al treilea pulsar observabil şi în domeniul optic, vîrsta lui fiind evaluată la circa un miliard de ani.

Din datele observaţionale şi consideraţiile teoretice s-a ajuns la concluzia că pulsarii cu perioade mai mici sînt mai bătrîni, aceştia din urmă şi-au pierdut deja o mare parte din cantitatea de energie iniţială. Se pare că rata naşterii pulsarilor în Galaxie este de opt pulsari/an.

Imediat după formarea sa, o stea neutronică are o rotaţie axială extrem de rapidă, dar cu timpul rotaţia respectivă se încetineşte, fapt constatat observaţional prin detectarea

creșterii perioadelor corespunzătoare. De aceea, în interiorul nucleului stelei cresc forțele de tensiune care apoi duc la intensificarea activității „seismice" care ar determina o serie de „zguduituri" stelare. Un astfel de caz este considerat a avea loc la Pulsarul din Vela (PSR 0833-45) la care, în ziua de 3 martie 1969, s-a detectat o scădere bruscă a perioadei, cu vreo 200 nanosecunde. După această dată perioada a crescut iarăși cu aceeași rată ca și mai înainte. Apoi, după circa 2,5 ani, la sfîrșitul anului 1971, fenomenul s-a repetat la aproximativ aceeași scală. Un astfel de fenomen a primit denumirea de „zguduitură stelară", iar importanța sa constă în aceea că prin analiza datelor observaționale avem posibilitatea de a cerceta interiorul stelar, așa cum prin cutremurele de Pămînt se examinează structura internă a planetei noastre.

În cazul în care variațiile perioadelor pulsarilor au un caracter periodic se poate presupune că steaua neutronică corespunzătoare face parte dintr-un sistem stelar dublu. Un astfel de obiect a fost descoperit a fi pulsarul PSR 1913 + 16, fapt care vine să arate că această ipoteză merită o atenție deosebită.

În timpul scurs între octombrie 1977 și noiembrie 1981, cu un radiotelescop de 92 m, pe frecvențele dintre 340 și 410 MHz, a fost observat pulsarul PSR 0820 + 02, iar rezultatele astfel obținute au arătat că și acesta face parte dintr-un sistem binar.

În anul 1986, din 500 de pulsari radio, șapte erau cunoscuți a face parte din sisteme stelare duble : 1855 + 09, 1953 + 29, 1913 + 16, 0655 + 64, 1831 — 00, 0820 + 02 și 2303 + 46; aici cifrele respective reprezintă coordonatele ecuatoriale (α și δ) corespunzătoare.

În luna mai 1981, în Norul Mare al lui Magellan s-a descoperit pulsarul extragalactic PSR 0529—66, descoperire confirmată și prin observațiile din februarie 1982. El are perioada $P = 0,9571407$ s și vine să susțină legătura dintre pulsari și resturile de supernove.

În legătură cu mecanismul care stă la baza emisiei radio a pulsarilor există mai multe ipoteze, fiecare fiind bazată pe existența unei stele neutronice în rotație rapidă și cu un cîmp magnetic puternic (10^{12} — 10^{13} Gs). Radiația radio a pulsarilor este emisă de anumite arii mici (pete) situate undeva

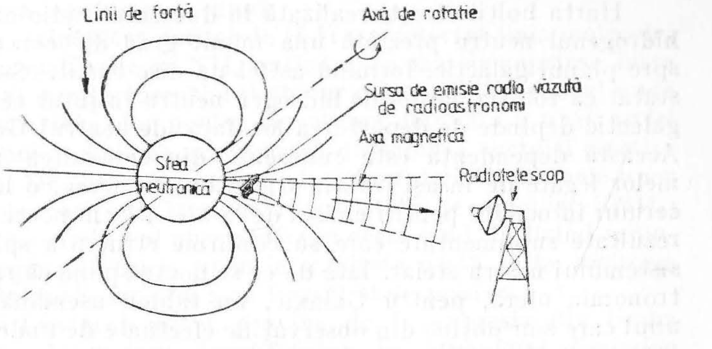


Fig. 2.7. Model schematic pentru un pulsar radio.

în apropierea polilor magnetici, fluxul respectiv fiind îngust și bine direcționat. Dacă axa magnetică a pulsarului nu coincide cu axa sa de rotație, la fiecare rotație a stelei neutronice observatorul poate ajunge în conul fluxului de emisie radio. De aceea, de pe Pămînt, fenomenul de pulsar se vede a fi asemănător cu un far maritim (vezi figura 2.7).

Deși există multe probleme nelămurite în legătură cu mecanismul principal care stă la baza pulsarilor, astronomii sînt convinși că cercetarea amănunțită a unor astfel de obiecte ar putea aduce contribuții importante cu privire la stadiile finale ale evoluției stelare. În plus, observarea pulsarilor ar putea furniza datele necesare și pentru verificarea teoriei relativității.

c) *Radiosurse interstelare : hidrogen neutru (H I), hidrogen ionizat (H II) și maseri*

i) Așa cum am mai amintit, hidrogenul neutru (H I) interstelar poate să absoarbă radiațiile cu lungimea de undă $\lambda = 21$ cm. Această radiolinie este determinată de tranziția în structura hiperfină a stării fundamentale a atomului de hidrogen, profilul unei astfel de linii putînd depinde de direcția din care vine radiația respectivă. De obicei se evidențiază unele maxime în lărgimea liniei respective, astfel de maxime fiind caracteristice radiațiilor care vin de la nori de HI care se deplasează în spațiu cu viteze radiale bine determinate.

Harta bolții cerești realizată în domeniul radio arată că hidrogenul neutru prezintă una numit grad de concentrare spre planul galactic, formînd astfel un disc turtit. S-a constatat că rotația norilor de hidrogen neutru în jurul centrului galactic depinde de depărtarea lor față de centrul Galaxiei. Această dependență este cunoscută din cercetarea problemelor legate de însăși rotația Galaxiei. De aceea, o hartă a cerului întocmită pentru emisia de la $\lambda = 21$ cm poate aduce rezultate suplimentare care să confirme structura spirală a sistemului nostru stelar. Iată de ce se poate spune că radioastronomia oferă, pentru Galaxie, un tablou asemănător cu unul care s-ar obține din observațiile efectuate de undeva din exteriorul ei.

ii) *Hidrogenul interstelar ionizat (H II)*, sub formă de regiuni mici și dense, a fost descoperit în anul 1967, prin observații efectuate de radioastronomi. De atunci s-au întreprins diferite cercetări asupra unor astfel de regiuni, datele observaționale fiind obținute în mai multe domenii spectrale.

Analiza complexă a datelor observaționale existente a dus la concluzia că regiunile de hidrogen ionizat (H II) reprezintă „locul de naștere" al grupelor de stele de tipurile spectrale O și B, un astfel de exemplu fiind cunoscut sub denumirea de nebuloasa W_3 (vezi și paragraful 3.4.).

Din punct de vedere structural, pentru regiunile de H II se stabilesc două clase : clasa I (ultracompacte) și clasa II (compacte). Uneori, obiectele din clasa II se pot observa și cu aparatele specifice domeniului optic.

În prezent se cunosc peste o sută de regiuni ultracompacte și compacte care au fost detectate prin observații radio. Spectrul continuu al acestora este de natură bremsstrahlung termic.

În general, regiunile de H II sînt asociate în grupuri. În centrul fiecărui grup se găsește una dintre cele mai evoluate regiuni, cele mai puțin evoluate fiind distribuite prin părțile periferice. Foarte probabil că aceste grupuri sînt asociate și cu părțile periferice ale anumitor nori moleculari.

Cercetările de pînă acum au arătat că norii moleculari sînt mult mai mari decît regiunile de H II. Ei sînt formațiuni complexe, alungite, cu dimensiunile de ordinul a 10×40 pc

procesul de formare al stelelor fiind inițiat într-o anumită regiune a norilor moleculari.

În vecinătatea norilor de H II s-a detectat linia moleculei NH_3, formațiunile de NH_3 putînd avea masele cuprinse între 10 și 100 mase solare. Norul obscur ρ Ophiuchi este locul unde se „nasc" stele, dar pentru cercetarea detaliată a unei astfel de regiuni trebuie să se cunoască distribuția energiei cinetice interne. De aceea se are în vedere faptul că în nucleele unor astfel de nori se găsesc mari cantități de amoniac (NH_3) și se recomandă noi observații. În acest mod, utilizînd radiotelescoape puternice, primele rezultate arată că în regiunea lui ρ Ophiuchi încă nu s-au format stele masive.

iii) Cuvîntul *maser* provine de la expresia din limba engleză ; *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (= amplificarea microundelor prin emisie stimulată de radiație). De aceea, pentru a înțelege modul în care funcționează maserii trebue cunoscut procesul de emisie stimulată.

Se presupune că o moleculă este excitată atunci cînd ea se găsește într-o stare energetică superioară stării energetice fundamentale. Trecerea de la starea energetică superioară spre una inferioară se realizează prin emisie de fotoni, emisia respectivă putînd să fie spontană sau stimulată.

Emisia stimulată se produce atunci cînd are loc o interacțiune între molecule și fotonii care vin din exterior. Dar pentru ca să se realizeze o asemenea interacțiune trebuie ca fotonul incident să aibă o energie egală cu diferența de energie dintre nivelul superior și unul inferior. Prin acest proces fotonul incident smulge din moleculă un foton care va avea aceleași proprietăți : lungime de undă, polarizare și direcție de propagare.

Pentru o mai bună înțelegere a efectului maser să considerăm un anumit număr de molecule în starea energetică (1) (vezi figura 2.8), sensul de creștere a energiei fiind marcat prin săgeata din stînga de pe figura 2.8.

Fie, mai departe, un nivel energetic superior (3) caracterizat prin durata de existență de 10^{-8} secunde. Apoi considerăm nivelul energetic intermediar metastabil (2), pe care moleculele pot să rămînă circa 10^{-3} secunde.

Fiind stabilite cele trei nivele energetice, efectul maser se derulează în următoarele etape :

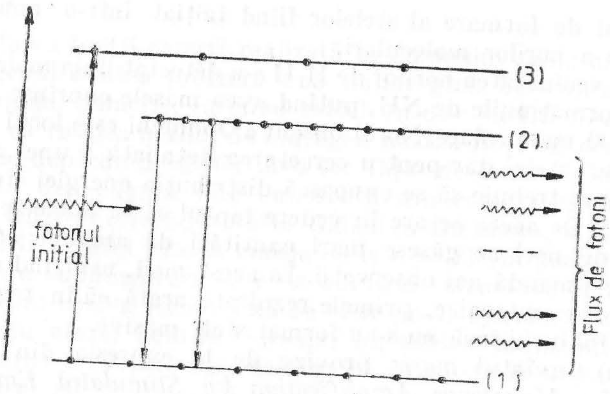


Fig. 2.8. Schema de funcționare a unui maser.

— Moleculele de pe nivelul (1) pot fi aduse în starea de excitare (3) prin următoarele mecanisme : a) ciocnirea dintre moleculele respective și particulele cosmice și b) absorbția de radiație din exterior. De asemenea, nivelul (3) mai poate fi populat prin tranzițiile spontane ale moleculelor de pe nivelele energetice superioare nivelului (3).

— Moleculele de pe nivelul (3), după 10^{-8} secunde, trec spontan pe nivelul inferior (2), unde timpul de existență este mult mai mare, fapt pentru care pe acest nivel se poate acumula un număr mare de molecule. În acest fel se realizează o inversie de populație între nivelele (2) și (1), adică o suprapopulare a nivelului (2).

— Prin emisia stimulată, moleculele de pe nivelul (2) trec pe nivelul (1), emițînd un număr mare de fotoni care, în drumul lor, pot întîlni alte molecule excitate în starea (2) pe care le dezexcită, amplificînd fluxul inițial de fotoni.

A fost o surpriză considerabilă în anul 1963 cînd, pe microunde, s-a detectat o radiație ce aparținea moleculei de hidroxil (OH) din gazul rarefiat situat în spațiul interstelar. Era prima moleculă interstelară descoperită de radioastronomie, astronomia optică cunoscînd de mai înainte moleculele CH și CN. Au urmat apoi descoperirile altor molecule interstelare : vapori de apă, amoniac, formaldehida etc.

Analiza datelor observaționale a dus la concluzia că sursele maser ar putea fi incluse în două clase : a) surse maser cu 2 linii spectrale satelite care ar coincide cu liniile stelelor „reci" puternic evoluate — maseri bătrîni și b) surse maser cu linii principale care aparțin mai ales regiunilor compacte de H II, adică ale regiunilor în care are loc formarea stelelor — maseri tineri. Există cel puțin trei caracteristici care fac distincție între cele două categorii de maseri : (1) maserii tineri sînt mai luminoși decît cei asociați cu stele evoluate, (2) maserii tineri au lumina polarizată circular (sau, uneori, liniar) în liniile OH și (3) în jurul stelelor evoluate se găsesc maseri SiO. Există peste 100 maseri tineri detectați. Emisia moleculei OH prezintă variații la scala de timp de ordinul lunilor.

Pe microunde, starea fundamentală în spectrul hidroxilului (OH) a fost înțeleasă cu mult timp înainte ca radioastronomii să fi detectat această moleculă. Este vorba de un cvartet de linii cu frecvențele de 1 612, 1 665, 1 667 și 1 720 MHz, care corespundeau la lungimea de undă de aproximativ 18 cm. Primele observații ale unor surse asociate de maserii OH au arătat că intensitățile observate sînt mult mai mari decît era de așteptat de la abundența cosmică evaluată pentru molecule OH.

Observații recente, efectuate cu radiointerferometrele cu baze intercontinentale, au arătat că energiile moleculare OH provin de la anumite „pete" mici, de numai 20 de unități astronomice în diametru. De aceea, dacă ne referim la regiuni mici, va trebui să admitem luminozitați superficiale mari, fapt care ar implica aici temperaturi foarte mari, de ordinul a 10^{12} K.

Dar o temperatură mare este greu de acceptat, motiv pentru care se presupune că regiunile de OH nu sînt în echilibru termic cu vecinătatea lor. De aici se trage concluzia că aceste regiuni sînt supuse unei emisii stimulate de tipul maser. Într-un maser , semnalul pe microunde de la o tranziție atomică sau moleculară poate fi selectiv amplificat mult peste intensitatea pe care ar putea s-o producă emisia termică corespunzătoare. Polarizarea circulară puternică este, de asemenea, un indicator al procesului maser.

Dar, așa cum am amintit și mai înainte, pentru ca un maser să lucreze în mod continuu trebuie să existe un mecanism prin care să se realizeze aprovizionarea cu energie în procesul de stimulare și să se asigure numărul mare de molecule cu stări energetice superioare. Este necesar un mecanism care să joace rolul unei pompe. Mecanica cuantică explică mecanismul de pompare prin mișcările de rotație și vibrație ale atomilor de oxigen și hidrogen, precum și prin mișcările orbitale ale electronilor legați.

Urmărirea radio a cerului a relevat existența unui mare număr de surse cu emisie a hidroxilului (OH) și care erau asociate cu : nebuloase infraroșii, resturi de supernove, nori de praf, regiuni de H II și stele variabile de tipul Mira Ceti. Au fost descoperiți maseri de OH_2 pe lungime de undă $\lambda =$ 1,35 cm. Astfel de descoperiri au adus informații valoroase cu privire la starea fizică a materiei interstelare.

d) *Surse de radiație radio din centrul Galaxiei*

În direcția centrului galactic se găsește una dintre cele mai puternice radiosurse, fapt care explică și rezultatele obținute încă de Jansky la începutul anilor '30. Este vorba de radiosursa Sagittarius A (Sgr A), care are secțiunea transversală aparentă de aproximativ 2'. Observațiile efectuate cu radiotelescoape puternice au pus în evidență faptul că radiosursa Sgr A este alcătuită din două componente : sursa din partea de vest — Sgr A (W) — care pare a fi situată în centrul Galaxiei și sursa de est — Sgr A (E) — care reprezintă restul unei supernove.

Pe harta observațiilor radio (vezi figura 2.9) sursa Sgr A (W) apare ca o nebuloasă spirală cu brațele compuse din nori de gaz ionizat. Centrul acestei nebuloase spirale este notat prin Sgr A_*, iar la nord de acesta, la numai 2", se află radiosursa compactă nontermică Sgr A_*. Radiația radio a acesteia din urmă este de natură sincrotron și are un spectru neobișnuit pentru obiectele galactice ; aici densitatea spectrală a fluxului crește odată cu creșterea frecvențelor la care se efectuează observațiile.

Contribuții importante la cercetarea centrului Galaxiei au fost aduse prin obținerea unor date observaționale în toate domeniile spectrale. În ultimul timp s-au adunat date din care rezultă că în centrul Galaxiei se află un nucleu care

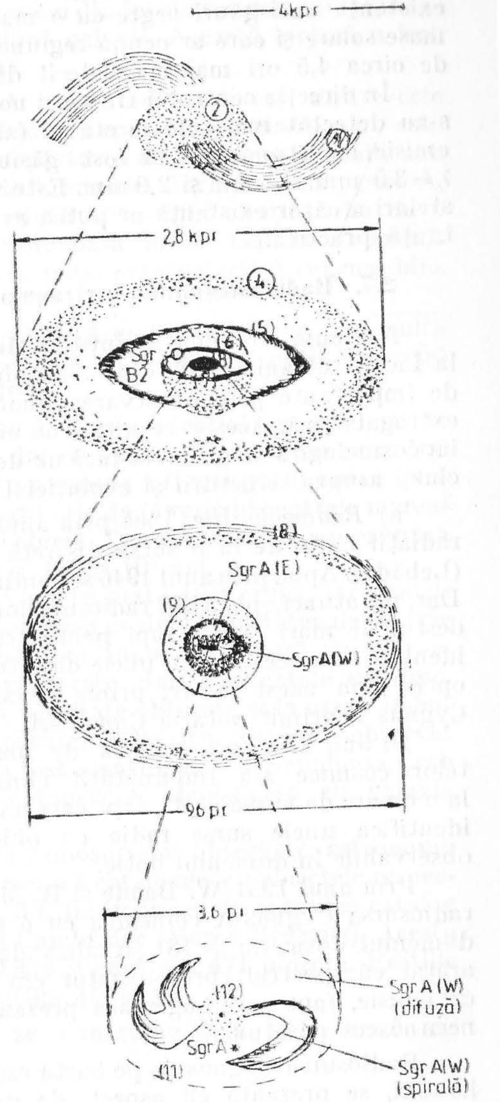


Fig. 2.9. Reprezentarea schematică a centrului Galaxiei la scale diferite : (1) brațe spirale care se derulează : (2) roiul stelar central; (4) limita roiului stelar central ; (5) limita discului gazos în rotație ; (6) limita regiunii de formare a stelelor ; (7) inel de hidrogen molecular : (8) radiație difuză X : (9) nor central de praf ; (10) inel central de praf ; (11) regiune anormală de formare a stelelor : (12) nucleul spiralei centrale Sgr A_*.

rămîne invizibil la toate lungimile de undă. Ar fi vorba de existența unei găuri negre cu o masă de circa un milion de mase solare și care ar ocupa regiunea centrală pe o întindere de circa 4,5 ori mai mare decît diametrul orbitei terestre.

În direcția centrului Galaxiei noastre, spre Sagittarius B, s-au detectat molecule de etanol (alcool etilic). Trei linii de emisie ale etanolului au fost găsite la lungimile de undă $\lambda=3{,}5$ mm; 3,3 mm și 2,9 mm. Este vorba de niște nori interstelari a căror existență ar putea avea și o eventuală importanță practică.

2.7. Radioastronomia extragalactică

Așa cum am mai amintit, radioastronomia se impune la începutul anilor '50, cînd s-au obținut rezultate deosebit de importante prin observarea unor surse radio de natură extragalactică. Aceste rezultate au uimit lumea astronomilor, iar cosmologii s-au grăbit să facă uz de ele pentru a trage concluzii asupra structurii și evoluției Universului.

a) *Radiogalaxiile*. Încă prin anul 1944 s-au recepționat radiații radio de la o sursă discretă din constelația Cygnus (Lebăda). Apoi, prin anul 1946 se confirmă rezultatul respectiv. Dar, pe atunci, pozițiile radiosurselor erau stabilite cu erori destul de mari ($\pm 6°$), fapt pentru care nu se putea realiza identificarea acestora cu unele obiecte observate în domeniul optic. Din acest motiv, prima sursă radio observată în Cygnus a primit notația *Cygnus-A*.

În anii următori, tehnica de observare radio a obiectelor cosmice s-a îmbunătățit considerabil, ajungîndu-se la o eroare de numai $\pm 1°$, fapt care a dus la posibilitatea de a identifica unele surse radio cu obiectele corespunzătoare observabile în domeniul optic.

Prin anul 1951 W. Baade și R. Minkowski au stabilit că radiosursa Cygnus-A coincidea cu o galaxie foarte slabă în domeniul optic ($m = 18$). Analiza datelor observaționale a arătat că spectrul corespunzător era caracterizat prin linii de emisie, fapt care sugerează prezența unui fenomen încă necunoscut pe atunci.

Radiosursa Cygnus-A, pe harta radio a lui Baade și Minkowski, se prezenta cu aspect de galaxie dublă, distanța

dintre cele două centre (bulbi) a fost evaluată la 200 kpc, adică de vreo șapte ori diametrul Galaxiei noastre. Radiația radio a fost presupusă a proveni din încălzirea gazului interstelar în timpul întîlnirii a două galaxii. Această ipoteză a fost însă în curînd abandonată.

Sursa radio Cygnus-A s-a dovedit a fi una dintre cele mai intense radiosurse, a doua după Cassiopeia-A, care este un rest de supernovă. Cu depărtarea de 200 Mpc (650 milioane ani lumină), prin intermediul formulei (1.2), pentru Cygnus-A, rezultă magnitudinea absolută $M = -20{,}5$; este vorba de o supergalaxie mult mai luminoasă decît Galaxia noastră. Probabil, aceasta este sursa radio extragalactică cea mai bine studiată.

În domeniul radio, Cygnus-A emite de 10^{26} ori mai multă energie decît Soarele, pe cînd în domeniul optic raportul respectiv este de numai 10^{11}.

În radiosursa Cygnus-A s-au evidențiat imenși nori de gaz care se mișcă haotic, dar cu vizteze foarte mari ($v \approx 500$ km/s). Aceste mișcări sînt presupuse a fi rezultatul unei explozii în urma căreia ar fi apărut cele două regiuni centrale marcate pe harta radio a acestui obiect. Timpul scurs de la presupusa explozie ar fi cuprins între 10^3 și 10^6 ani.

În prezent Cygnus-A emite peste 10^{45} ergi/s, iar pentru emisia totală corespunzătoare s-a evaluat cantitatea de energie de 10^{60} ergi. Spectrul este continuu, de natură sincrotron, iar intensitatea respectivă crește cînd frecvențele descresc.

Încurajați de primele rezultate obținute și în urma îmbunătățirii tehnicii de observare, radioastronomii au observat sursele : Taurus-A care a fost identificată cu Nebuloasa Crab din Galaxia noastră, Centaurus-A identificată cu galaxia optică NGC 5128 etc.

O dată cu înmulțirea radiosurselor observate, astronomii au simțit nevoia să întocmească cataloage cu obiectele respective. Astfel, de exemplu, 3 C însemna cel de al treilea catalog de radiosurse întocmit la Cambridge (Marea Britanie). Acesta a fost publicat în anul 1959 și conținea 471 obiecte. Edițiile următoare au avut notațiile 4C și 5C.

Pînă în anul 1975 se cunoșteau deja peste două mii de radiogalaxii.

Avînd în vedere importanța rezultatelor obținute prin observarea radiogalaxiilor, facem aici cîteva precizări asupra celor mai remarcabile obiecte din această categorie.

Radiogalaxia Centaurus-A (NGC 5128) a fost descoperită în anul 1947. Este una dintre primele surse radio detectate în spațiul extragalactic, fiind și una dintre cele mai puternice surse de acest fel. Se găsește la distanța de 16 milioane ani lumină, are diametrul aparent de 0,5°, ceea ce duce la un diametru liniar de 147 mii ani lumină. Cu depărtarea de 5 Mpc și magnitudinea aparentă $m = 7$, rezultă magnitudinea absolută $M = -21$. Se îndepărtează de noi cu viteza de 400 km/s.

Pe bolta cerească, Centaurus-A se proiectează la numai 4° față de roiul globular Omega Centauri. Este o galaxie eliptică gigantă, dar privită prin telescop ea se prezintă ca o pată rotundă, fiind traversată de o bandă întunecată (vezi figura 2.10).

Ca o sursă puternică de energie, Centaurus-A a fost observată în toate domeniile spectrale. Se pare că nucleul acestei galaxii este scufundat într-un nor de praf, motiv pentru care el este greu de observat în domeniul optic și ultraviolet.

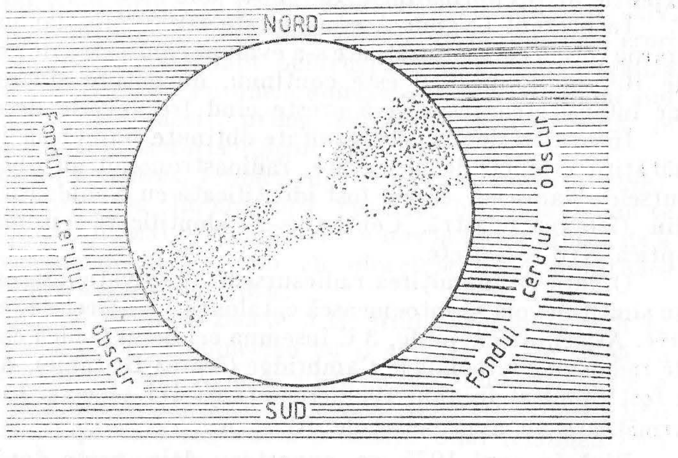


Fig. 2.10. Imaginea optică a radiogalaxiei Centaurus-A (NGC 5128).

În anul 1961, Centaurus-A a fost observat cu un radiotelescop cu mare putere de separare, fapt care a dus la concluzia că această sursă este alcătuită din două componente, doi lobi, care sînt surse radio puternice. Distanța unghiulară dintre aceste componente este de 7', iar diametrele lor aparente sînt de aproximativ 2' (minute de arc).

Cele două componente ale lui Centaurus-A sînt nori gazoși, simetric situați în raport cu centrul galaxiei optice NGC 5128. Axa care trece prin cei doi lobi radio și galaxia optică este perpendiculară pe planul determinat de „centura" întunecată. Harta radio a acestei surse este prezentată în figura 2.11.

Din punct de vedere spectral, cele două surse componente ale lui Centaurus-A se deosebesc foarte mult în intensitate. Se pare că o componentă se apropie de noi, iar alta se în-

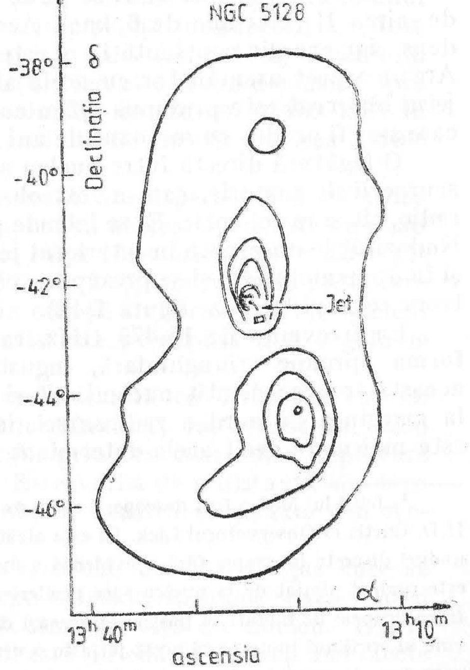


Fig. 2.11. Harta radio a sursei Centaurus-A la lungimile de undă cuprinse între 6 și 74 cm. Contururile sînt trasate prin punctele de aceeași intensitate. În partea de sud a lobului nordic, s-a evidențiat prezența unui jet.

depărtează, mişcările respective efectuîndu-se cu viteza v = 0,3 c (c = viteza luminii) în raport cu nucleul respectiv.

Ca şi în cazul altor radiogalaxii, se presupune că energia emisă în undele radio este de natură sincrotron.

Radiogalaxia Virgo-A (M 87, NGC 4486, 3C 274) se află în centrul roiului de galaxii din constelaţia Virgo (Fecioara). Aici s-au observat doi curenţi de radiaţie radio, ei fiind orientaţi în direcţii opuse faţă de poziţia centrală.

Situată la depărtarea de 15 Mpc, galaxia M 87 este celebră prin jetul său observat în domeniul optic, fapt care a dus la includerea acestui obiect printre galaxiile cu nuclee active.

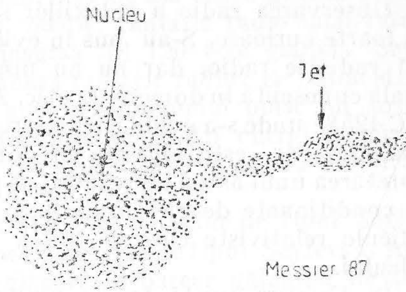
Radiaţia radio a lui Virgo-A provine atît de la nucleul central, cît şi de la o regiune cu diametrul de ordinul miilor de ani lumină. La frecvenţa de 1 GHz, fluxul total al lui Virgo-A provine de la un halo care se întinde pe circa 16′, iar la frecvenţe şi mai mari se pune în evidenţă nucleul mic de circa 1′ (mai mic de 6 kpc). Acest nucleu este masiv şi dens, iar energia conţinută în el este de ordinul a 10^{56} ergi. Are un aspect asemănător cu acela al unei galaxii duble, iar jetul observat este presupus a fi o consecinţă a unei explozii care s-ar fi produs cu milioane de ani în urmă [1].

O legătură directă între nucleu şi halo o reprezintă jetul scurgerii de materie, care a fost observat atît în domeniul radio, cît şi în cel optic. El se întinde pe circa 32″ (~3,1 kpc). Nodozităţile observate în interiorul jetului se detectează bine şi în domeniul radio şi se presupune că sînt alcătuite din electroni relativişti (vezi figura 2.12).

La frecvenţa de 15,375 GHz, radiogalaxia Virgo-A are forma aproape triunghiulară, îngustîndu-se spre vest. La această frecvenţă, atît nucleul, cît şi jetul, apar a fi situate la marginea de nord a radiosursei, iar gradul de polarizare este mai mare decît acela determinat din observaţiile optice.

[1] Jetul lui M87 a fost descoperit cu peste 65 de ani în urmă de către H.D. Curtis la Observatorul Lick. El este alcătuit dintr-un număr mare de noduri discrete în grupe, fără o evidenţă a materialului internoduri. Jetul este perfect aliniat de la nucleu spre periferie, cu un fel de oscilaţii mici. Între grupele de noduri se păstrează aceeaşi distanţă constantă, fapt care vine în sprijinul ipotezei că acest jet este o urmare a unei serii de explozii succesive, la aproximativ acelaşi interval de timp.

Fig. 2.12. Galaxia M87 (NGC 4486) şi jetul descoperit în domeniul optic.



Datele obţinute prin cercetarea gradului de polarizare furnizează informaţii cu privire la distribuţia electronilor termici şi intensitatea cîmpului magnetic din regiunile în care sînt situate astfel de radiosurse.

Radiosursa Hercules-A (3 C 348) a fost descoperită în anul 1948 şi se află pe locul patru în privinţa luminozităţii. A fost identificată cu o galaxie optică slabă (m = 18,5) situată în roiul de galaxii din constelaţia Hercules şi are deplasare spre roşu z = 0,154. Are dimensiunile de ordinul a 460 kpc, în domeniul radio emiţînd o cantitate de energie de circa $3 \cdot 10^{18}$ ergi/s.

Pe harta radio, Hercules-A are aspectul a două surse întinse simetric situate în raport cu nucleul optic. Are un cîmp magnetic puternic, liniile de forţă fiind orientate în direcţiile determinate de lobii radio. Peste 50% din radiaţia radio este polarizată şi este emisă prin erupţii simetrice faţă de nucleul optic. Şi această radiogalaxie este presupusă a fi o galaxie cu nucleu activ.

Din datele observaţionale rezultă că structura cu doi lobi este caracteristică radiogalaxiilor, radiosursa 3C 236 avînd componentele separate prin cea mai mare depărtare cunoscută pînă în prezent. Este vorba de o distanţă de vreo opt ori distanţa dintre Galaxia noastră şi galaxia din Andromeda (M 31).

Unele radiogalaxii au cozi sau curenţi de gaz care se deplasează de la interior spe exterior, în unele cazuri fiind prezenţi doi curenţi situaţi simetric faţă de nucleu. Explicarea unor astfel de situaţii este dificilă, se invocă aici efecte dinamice sau o bifurcare a cîmpului magnetic.

Observarea radio a galaxiilor spirale relevă particularități foarte curioase. S-au pus în evidență brațele spirale care emit radiație radio, dar nu au nimic comun cu structura spirală cunoscută în domeniul optic. Astfel este cazul galaxiei NGC 4258, unde s-a evidențiat o structură spirală în domeniul radio, dar care este absentă în domeniul optic. Pentru interpretarea unui astfel de rezultat se presupune că radiospirele sînt condiționate de ejecția de gaz, adică de aruncarea unor particule relativiste care se mișcă în cîmpul magnetic al nucleului.

În Univers există foarte multe radiogalaxii puternice, iar numărul celor cunoscute crește odată cu perfecționarea tehnicii de observare. Se cunosc radiogalaxii la depărtări de ordinul miliardelor de ani lumină, cea mai îndepărtată radiogalaxie cunoscută este sursa 3C 123, la circa opt miliarde ani lumină, cu deplasarea spre roșu $z = 0{,}67$. Aceasta este situată la 13° nord de Aldebaran (α Tauri), are magnitudinea aparentă $m = 21{,}7$, iar în spectru s-a detectat linia de emisie a oxigenului ($\lambda = 3\,728$ Å) care aici este deplasată la $\lambda = 6\,100$ Å. Această radiosursă este de circa 10 ori mai mare decît Galaxia noastră.

Aproape întotdeauna radiogalaxiile puternice sînt asociate cu galaxii eliptice gigante. În multe cazuri, radiosursele puternice se identifică cu cele mai luminoase galaxii eliptice din anumite roiuri de galaxii, radiația radio intensă putînd fi condiționată de gazul abundent din nucleele corespunzătoare.

Pentru mecanismul prin care se produce radiația radio s-au emis mai multe ipoteze dintre care amintim: 1) mișcarea electronilor relativiști în cîmpul magnetic, 2) acreția de gaz pe un obiect compact (stea neutronică sau gaură neagră) și 3) regiunile componente radio ar fi mase imense de gaz rece care, sub influența unui impuls inițial (de exemplu o explozie) are o mișcare rapidă prin mediul intergalactic și duce cu sine o mare cantitate de energie. Se speră, totuși, că noile cercetări vor aduce precizări suplimentare cu privire la valabilitatea unora dintre aceste ipoteze.

În privința galaxiilor Seyfert (v. paragraful 1.9) trebuie să amintim faptul că ele nu sînt surse radio intense, doar 10% din această categorie de obiecte au fost înregistrate în catalogul

cu radiosurse 3C. În schimb, față de așa-zisele galaxii normale, galaxiile Seyfert au, în medie, radiație radio mai intensă. Foarte probabil că radiosursa 3C 120 este galaxia Seyfert cunoscută cu cea mai intensă radiație radio ; ea „coincide" cu steaua variabilă BW Tauri. În domeniul optic au fost înregistrate variații rapide ale intensității energiei emise, la scala de timp de ordinul cîtorva săptămîni, dar cu amplitudini relativ mici.

Observațional s-a constatat că galaxiile de tipul Seyfert 2 au emisie radio mai intensă decît cele de tipul Seyfert 1. Această situație este surprinzătoare, deoarece galaxiile Seyfert 1 au spectru continuu în domeniul optic cu un pronunțat caracter nontermic, mai ales la lungimea de undă $\lambda = 21$ cm.

În tabelul 2.1 prezentăm cele mai importante caracteristici ale cîtorva dintre cele mai luminoase radiosurse, în ordinea descrescătoare a fluxului exprimat în Jansky la frecvența de 178 MHz. Acestea sînt observabile din emisfera boreală.

Încă prin anul 1928, fizicianul englez D. Jeans a emis ipoteza, care pe atunci nu decurgea din fapte cunoscute, că

Tabelul 2.1.

Radiosurse luminoase

Denumirea	Coordonatele ecuatoriale		Densitatea fluxului în Jansky, la $\nu = 178$ MHz	Tipul
	α_{2000}	δ_{2000}		
Cassiopeia-A	$23^h 23^m$	+58°49'	11,00	rest de supernovă
Cygnus-A	20 00	+40 45	8,00	galaxie
Taurus-A	05 33	+22 00	1,40	rest de supernovă
Virgo-A	12 30	+12 56	0,97	galaxie
Cygnus X-1	20 21	+40 19	0,60	regiune de H II
3C 400	19 23	+14 20	0,54	regiune HII (W51)
3C 392	18 56	+01 12	0,40	rest de supernovă
Hercules-A	16 51	+05 00	0,325	galaxie (3C 348)
3C 157	06 18	+22 45	0,210	rest de supernovă
3C 353	17 20	−00 58	0,203	galaxie
Sagittarius-A	14 43	−28 50	1,000	nucleul Galaxiei
W 66	20 23	+40 10	?	rest de supernovă

centrele galaxiilor ar conține anumite puncte particulare (singularități), unde se petrec transformări neobișnuite ale materiei, transformări care, foarte probabil, nu se încadrează în legile cunoscute ale fizicii. Au trecut de atunci doar cîteva decenii pînă cînd descoperirea radiogalaxiilor, exploziile acestora și ale quasarilor au adus astrofizica în fața unor probleme deosebit de complexe. Este vorba de problemele legate de sursele unor energii uriașe și procesele care determină apariția exploziilor în cele mai complexe sisteme stelare extragalactice.

b) *Observarea lacertidelor în domeniul radio*

În anul 1968, prin observații se stabilește că sursa radio VRO 42.22,011 este imaginea radio a stelei variabile BL Lacertae, aceasta din urmă fiind descoperită de C. Hoffmeister în anul 1929. Variabilitatea acestei stele are loc între magnitudinile aparente 12,4 și 16,3, în domeniul fotografic (vezi figura 2.13).

Pe plăcile fotografice, BL Lacertae are o imagine superficială, situație care face mai dificile măsurătorile de astro-

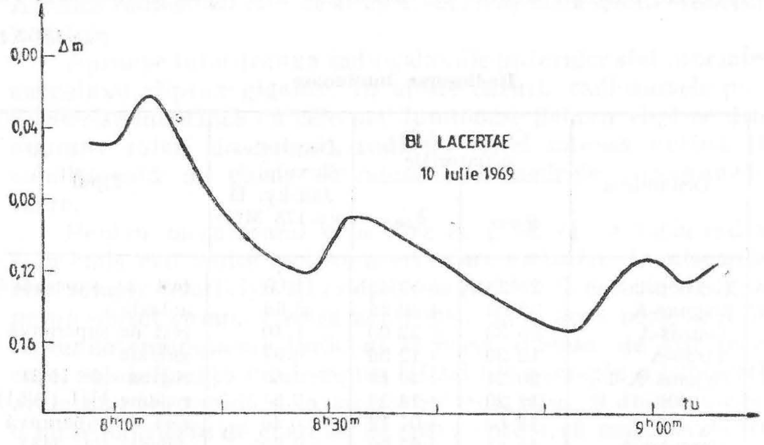


Fig. 2.13. Curba de lumină a lui BL Lacertae. În ordonată se află diferența de magnitudine în raport cu o stea de comparație ; s-a utilizat timpul universal în abscisă. Observațiile au fost efectuate la Observatorul de pe Muntele Wilson cu un reflector de 100 țoli în diametru.

fotometrie. Dimensiunile „petei" sînt evaluate la circa 33″ (în direcția nord est-sud vest) și 21″(nord vest-sud est). Așadar, este vorba de un obiect cu aspect stelar, dar scufundat într-o nebuloasă fină. În spectrul acesteia se pot observa linii slabe de emisie, pe cînd cele de absorbție lipsesc complet. De aceea deplasarea spre roșu s-a determinat cu mică precizie ($z \approx 0,02$), depărtarea corespunzătoare fiind evaluată la circa 300 Mpc.

Prin urmare, BL Lacertae este un obiect extragalactic, o galaxie care se găsește într-o fază timpurie de evoluție, cu magnitudinea absolută cuprinsă între −26,8 și −23,4. Ea este prototipul unei clase de obiecte cunoscute sub denumirea de *lacertide*.

Lacertidele sînt obiecte superluminoase și compacte, au un debit mare de emisie de energie în domeniul radio, lumina lor fiind puternic polarizată și cu fluctuații rapide. Sînt cele mai variabile surse dintre obiectele extragalactice, lumina lor variind la scala de timp de ordinul a cîtorva ore.

Energia lacertidelor este de 10^{10} ori mai mare decît aceea a Soarelui și este cuprinsă într-un volum de ordinul de mărime al spațiului ocupat de sistemul solar, energia emisă fiind de natură sincrotron.

Un obiect foarte curios și care aparține lacertidelor este cunoscut sub notația OJ 287 [al 287-lea obiect de pe lista cercetătorilor de la Universitatea din Ohio (S.U.A.)]. Acesta poate fi observat în constelația Cancer și prezintă o serie de caracteristici asemănătoare cu acelea ale lui BL Lacertae.

Din examinarea datelor observaționale, mai ales din cele fotografice, se constată că, la obiectul OJ 287, au fost remarcate cel puțin patru erupții în strălucire, erupții care au fost înregistrate în anii 1894, 1929, 1953—1955 și 1968. În cursul acestor erupții strălucirea a crescut pînă la magnitudinea aparentă $m = 13$, iar scala de timp a fost de ordinul de mărime al cîtorva luni.

La obiectele BL Lacertae și OJ 287 s-au detectat și variații la scala de timp de cîteva zile. La ambele obiecte s-au pus în evidență două feluri de variații în domeniul radio : una la scala de timp de 2—3 luni, iar alta la scala de numai 20 zile. Au fost semnalate fluctuații și la scala de ordinul unei zile.

În curbele de lumină ale lacertidelor, atît pe ramura ascendentă, cît și pe cea descendentă, apar unele maxime locale (un fel de cocoașă), situație care arată că aici pot să existe erupții cu intensități și durate diferite, dar ale căror efecte se suprapun.

Pînă în anul 1980 se cunoșteau vreo 60 de lacertide, în catalogul lui Véron din anul 1985 sînt trecute 73 astfel de obiecte (vezi M.-P. Véron-Cetty and P. Véron, A. Catalogue of Quasars and Active Nuclei, April 1985). Dintre acestea, în anul 1975, obiectul AO 0235+165 a suferit o erupție remarcabilă în timpul căreia a fost emisă o cantitate de energie de 10^{48} ergi/s ; atunci acesta fiind cunoscut ca cel mai luminos obiect din Univers!

Radiosursa AO 0235+164 a fost identificată cu un obiect stelar de culoare roșie, de magnitudine $m \approx 19$ și s-au determinat două deplasări spre roșu : $z_1 = 0{,}5239$ și $z_2 = 0{,}852$. În jurul acestui obiect s-a detectat o formațiune de materie nebulară, dar încă nu s-a precizat dacă este o „coincidență" optică sau dacă este vorba de o nebuloasă în care ar fi scufundat nucleul radiosursei.

c) *Descoperirea quasarilor*

Printre obiectele înregistrate în catalogul 3 C, cea de-a 48-a sursă (3 C 48) aparține unui grup de obiecte cu dimensiuni unghiulare foarte mici, de ordinul unei secunde de arc. Se bănuia existența unei clase noi de obiecte cosmice, dar fără să i se acorde o importanță deosebită.

Cu toate că la începutul anilor '60 pozițiile radiosurselor erau cunoscute cu o precizie mică, datorită ocultațiilor acestora de către Lună, pentru unele obiecte din această grupă s-au putut obține pozițiile cu o precizie de ordinul unei secunde de arc. O astfel de împrejurare i-a permis lui Cyril Hazard, în anul 1962, să constate că, în domeniul optic, radiosursei 3 C 273 îi corespundea un obiect cu aspect stelar de magnitudine $m = 13$.

Imediat după constatarea lui Hazard, Maarten Schmidt efectuează observații spectroscopice din care a rezultat că în spectrul lui 3C 273 se găseau linii din seria Balmer a hidrogenului [vezi formula (1.13)], dar cu deplasarea spre roșu $z = 0{,}16$.

În primăvara anului 1963, Jesse Greenstein și Thomas Matthews au reluat cazul lui 3C 48, pe care Allen Sandage îl identificase cu o „stea" de magnitudinea $m = 16$. Cu această ocazie se constată că, aici, linia H_β a hidrogenului era deplasată din domeniul verde în cel roșu al spectrului electromagnetic, cu deplasarea spre roșu $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0{,}37$.

Admițînd că deplasarea spre roșu observată este de natură cosmologică, condiționată de expansiunea Universului, din aplicarea formulei (1.27), pentru obiectul 3C 273 s-a evaluat distanța de circa trei miliarde ani lumină. Considerații asemănătoare au stabilit că obiectul 3C 48 se află la aproximativ 5 miliarde ani luminaă.

În condițiile amintite, pentru 3C 273 s-a calculat magnitudinea absolută $M = -27$, ceea ce arată că acest obiect emite cantitatea colosală de energie de 10^{46} ergi/s.

Din cauza dimensiunilor relativ mici și a cantității mari de energie emisă s-a ajuns la concluzia că, într-adevăr, este vorba de o nouă clasă de obiecte cosmice, care au fost numite *quasari* (quasi stellar radio sources = surse radio cvasistelare). Catalogul publicat de M.-P. Véron-Cetty și P. Véron (1985) conținea deja un număr de 2 835 quasari înregistrați.

Deși descoperiți cu aproximativ un sfert de secol în urmă, quasarii continuă să fie și astăzi o clasă de obiecte învăluite într-o negură enigmatică. În primul rînd mai există îndoieli cu privire la natura cosmologică a deplasării spre roșu a liniilor din spectrele corespunzătoare. Apoi, din observații fotometrice s-a pus în evidență variabilitatea energiei emise de aceste obiecte, fapt care a permis să se evalueze dimensiunile liniare corespunzătoare.

Quasarul 3C 273 are variația strălucirii detectată în diferite domenii spectrale, amplitudinea respectivă ajungînd pînă la aproximativ o magnitudine. În cazul cînd aceste variații se dovedesc a fi periodice se poate evalua diametrul liniar maxim care poate să fie de ordinul anilor lumină sau chiar mai mic.

Cu cunoștințele de care dispune astronomia de azi, încă nu se poate explica natura mecanismului prin care o regiune atît de mică ar fi capabilă să emită o cantitate de

energie atît de mare. În acest scop au fost propuse mai multe modele, dar pînă acum ne găsim tot în domeniul ipotezelor. Pentru unii quasari, cum sînt de exemplu Q 0957+561 și PG 1115+08, s-au pus în evidență imagini duble care, aparent, sînt separate între ele printr-o distanță unghiulară de numai cîteva secunde de arc. Unele obiecte din această categorie au imaginea dublată prin efectul de „lentilă gravitațională". Un astfel de efect este determinat de prezența unei galaxii, undeva între observator și quasar care influențează gravitațional asupra imaginii quasarului. Schema de principiu a unei astfel de lentile este prezentată pe figura 2.14.

Din cauza distanțelor mari pînă la care se observă quasarii, aceste obiecte pot fi considerate la limita observabilă a Universului. Astfel, de exemplu, obiectul OQ 127 (cel de al 127-lea obiect din catalogul radiosurselor detectate cu radiotelescopul Universității din Ohio), cu deplasarea spre roșu $z=3,53$, este cunoscut a fi cel mai îndepărtat obiect observat pînă acum. El se îndepărtează de noi cu o viteză a cărei valoare reprezintă circa 97% din viteza luminii. În funcție de valoarea adoptată pentru constanta lui Hubble [vezi formula (1.27)], pentru depărtarea acestui quasar rezultă o valoare cuprinsă între 12 și 18 miliarde ani lumină.

În ultimul timp au fost examinate atît hărțile radio ale quasarilor, cît și unele imagini fotografice ale acestora. Cu astfel de ocazii s-a constatat că, de fapt, quasarii nu au imagini strict punctiforme. Au fost evidențiate imagini centrale înconjurate de anumite regiuni difuze, cu strălucire slabă

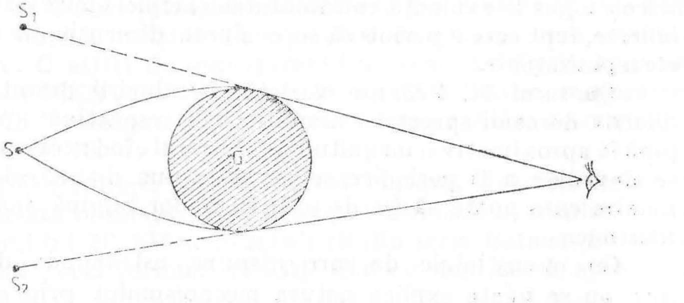


Fig. 2.14. Schema de principiu a unei lentile gravitaționale.

și aspect scămoșat. De aici a apărut ipoteza unei analogii care ar putea exista între quasari și galaxii.

În jurul quasarului 3C 48, alături de imaginile scămoșate s-au detectat linii spectrale care au fost presupuse a fi de origine stelară. Dacă această presupunere este corectă, legătura dintre quasari și galaxii este dovedită observațional. În acest caz, 3C 48 ar fi o galaxie cu magnitudinea absolută $M = -23$, adică de circa 100 de ori mai luminoasă decît Galaxia noastră.

Utilizarea observatoarelor orbitale pentru observarea quasarilor în diferite culori, așa cum vom sublinia în capitolele următoare, a contribuit la adunarea unor date observaționale care, în mod surprinzător, evidențiază și mai mult caracterul enigmatic al acestor obiecte.

Capitolul 3

ASTRONOMIA ÎN INFRAROȘU

Așa cum rezultă din paragraful 1.2, domeniul infraroșu al spectrului electromagnetic realizează legătura dintre domeniile optic și radio. Pentru interese practice el a fost divizat în infraroșul apropiat (10^5Å > λ > 10^4 Å) și infraroșul îndepărtat ($3 \cdot 10^6$ Å > λ > 10^5 Å). Pentru comoditatea exprimării, vorbind despre acest domeniu, vom exprima lungimile de undă în micrometri 1 μm = 10^4 Å = 1 micrometru.

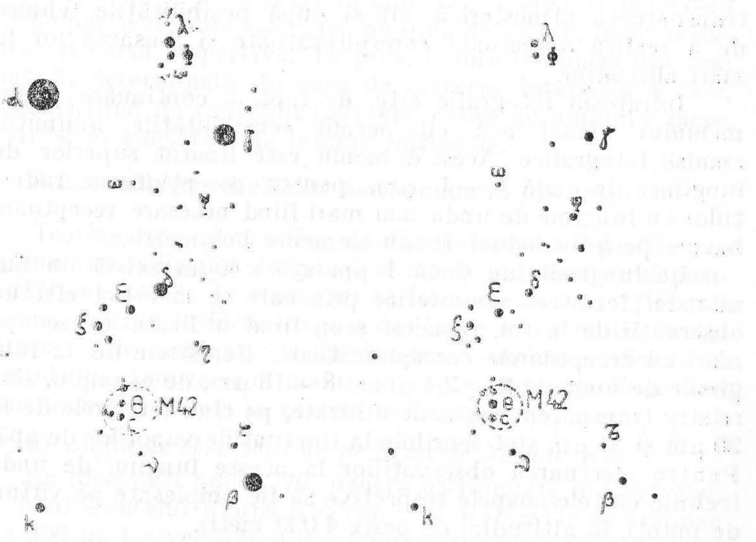
La începutul secolului al 19-lea, mai precis în anul 1800, prin intermediul unei prisme (vezi fig. 1.3) W. Herschel descompune lumina solară în componentele spectrale corespunzătoare și, deplasînd un termometru prin fața acestora, constată că în extremitatea roșie a spectrului, termometrul măsura căldura unor radiații care nu se vedeau cu ochiul liber. Era prima experiență destinată astronomiei invizibilului.

Deși promițătoare, din lipsă de tehnică adecvată, pînă nu demult, astronomia în infraroșu s-a limitat la cercetarea Soarelui, Lunii și celor mai strălucitoare planete. Abia pe la sfîrșitul anilor '50 și începutul anilor '60, ca o consecință a dezvoltării tehnicii construcțiilor de bolometre, fotorezistențe, filtre etc., precum și realizarea sistemelor speciale de răcire, devine posibilă detectarea unor noi surse de radiații infraroșii. Totuși, din cauza absorbției luminii la trecerea ei prin atmosfera terestră, adevărata dezvoltare a astronomiei în infraroșu s-a realizat abia atunci cînd receptoare speciale au fost amplasate la bordul unor avioane, baloane, rachete sau sateliți artificiali ai Pămîntului — *observatoare orbitale.*

3.1. Absorbția luminii infraroșii prin atmosferă terestră

Încă de la primele observații, efectuate cu receptoare lansate la mari altitudini, astronomia în infraroșu ajunge la

rezultate deosebit de interesante privind aspectul bolții cerești. Astfel, din examinarea vizuală a cerului înstelat, cu ochiul liber se pot observa aproximativ 6 000 stele. Cu un telescop care are diametrul de circa 1,5 m și care este dotat cu receptoare sensibile la domeniul infraroșu, de asemenea se pot observa vreo 6 000 de stele. Dar dintre acestea din urmă, numai o treime sînt comune celor două domenii spectrale. Prin urmare, există stele de la care recepționăm mai multă energie în vizual decît în infraroșu și invers. De aceea, aspectul unor constelații apare schimbat cînd efectuăm observații în unul din cele două domenii amintite. Ca un exemplu de constelație cu astfel de modificări este amintit Orionul. În infraroșu, steaua roșiatică Betelgeuse (α Orionis) este mult mai strălucitoare decît steaua albastră Rigel (β Orionis), pe cînd în ultraviolet Rigel este mai strălucitoare decît Betelgeuse (vezi figura 3.1).



Constelația Orion în infraroșu   Constelația Orion în ultraviolet

Fig. 3.1. a. Aspectul constelației Orion în infraroșu și în ultraviolet.

Cauza care determină aspecte diferite ale bolții cerești în diferite domenii spectrale este diferența de temperatură a obiectelor respective. Stelele cu temperaturi mari ($T > 5\,000$ K) emit cea mai mare parte a energiei lor în domeniul optic și ultraviolet, pe cînd stelele mai puțin fierbinți ($T < 5\,000$ K) au emisia maximă în infraroșu.

Stelele care radiază cea mai multă energie în infraroșu se numesc stele infraroșii, un exemplu de acest fel fiind steaua R Monocerotis — o stea cu strălucirea variabilă ($10 \leq m \leq 13$).

Așa cum am mai amintit, radiațiile care vin de la corpurile cerești sînt puternic absorbite de către moleculele de apă (H_2O) în stare de vapori și cele ale bioxidului de carbon (CO_2), care se află din abundență în păturile inferioare ale atmosferei terestre. La aceste absorbții se mai adaugă și contribuțiile modeste ale moleculelor: O_3, CO, ON_2 și CH_4. De aceea, din punct de vedere astronomic este avantajos ca domeniul infraroșu să-l diferențiem atît în funcție de transparența atmosferică, cît și după posibilitățile tehnice de a realiza detectoare corespunzătoare și lansarea lor la mari altitudini.

Infraroșul fotografic este, de fapt, o continuare a domeniului vizual atît cît permit sensibilitățile anumitor emulsii fotografice. Acest domeniu este limitat superior de lungimea de undă $\lambda = 1$ μm, pentru recepționarea radiațiilor cu lungime de undă mai mari fiind necesare receptoare bazate pe fotoconductori sau elemente bolometrice.

La lungimile de undă 1 μm $\leq \lambda \leq 40$ μm există un număr de „ferestre" atmosferice prin care se mai pot efectua observații de la sol, în acest scop fiind utilizate telescoape mari cu receptoarele corespunzătoare. Ferestrele de la lungimile de undă de 2 — 2,4 μm și 8 — 13 μm, de exemplu, sînt relativ transparente și mult utilizate, pe cînd ferestrele de la 20 μm și 34 μm sînt sensibile la fluctuațiile vaporilor de apă. Pentru efectuarea observațiilor la aceste lungimi de undă trebuie ca telescoapele respective să fie amplasate pe vîrfuri de munți, la altitudini de peste 4 000 metri.

Radiațiile cu lungimi de undă cuprinse între 40 μm și 350 μm nu se pot înregistra cu instrumentele de la sol, telescoapele respective trebuind să fie amplasate pe nave cosmice, în nacela unor baloane sau pe rachete. În apropiere de $\lambda =$

350 μm atmosfera devine treptat transparentă și pentru observații cu aparate de la sol. Prin urmare, în jurul lungimii de undă $\lambda = 350$ μm ($= 0,35$ mm) dispunem de fereastra „submilimetrică", iar între 0,7 mm și 1,4 mm avem fereastra milimetrică, aceste două ferestre fiind frecvent utilizate pentru efectuarea observațiilor cu telescoapele amplasate pe vîrfuri de munți înalți.

Delimitarea „ferestrelor" pentru radiațiile infraroșii poate fi considerată arbitrară, notarea acestora fiind o funcție de proprietățile receptoarelor utilizate. În literatura de specialitate se pot întîlni și alte notații pentru regiunile de transparență atmosferică.

În fine, menționăm aici și faptul că absorbția luminii prin atmosfera terestră nu este singurul efect care produce înroșirea corpurilor cerești. Un astfel de fenomen mai poate fi determinat și de difuzia luminii la trecerea ei printr-un nor de particule care s-ar găsi, pe linia de vizare, între observator și sursa respectivă. În plus, o înroșire puternică mai poate fi determinată de norii de materie interstelară care, încălziți fiind de radiațiile fierbinți emise de anumite surse, devin și ei emițători de lumină infraroșie.

3.2. Realizări tehnice în astronomia în infraroșu

Teoria arată și practica confirmă faptul că pentru recepționarea radiațiilor infraroșii avem la îndemînă două posibilități: a) Stațiile de observare să fie amplasate la altitudini cît mai mari și b) Telescoapele destinate astronomiei în infraroșu să fie amplasate la bordul unor sateliți artificiali ai Pămîntului. Asupra celor mai importante probleme din aceste domenii ne vom opri în cele ce urmează.

a) *Stația de observații de pe Muntele Mauna Kea*

La începutul anilor '70, pentru astronomia în infraroșu, pe vîrful Muntelui Mauna Kea (un vulcan stins) la altitudinea de 4 200 m, Universitatea din Hawaii dispunea deja de două telescoape cu diametrele de 0,6 m și respectiv 2,2 m. Condițiile meteorologice de acolo s-au dovedit a fi excelente pentru observații astronomice. La această înălțime, atmosfera conține de 10 ori mai puțini vapori de apă decît la nivelul mării; iată de ce locul respectiv s-a dovedit a fi cel mai potrivit

pentru amplasarea unor telescoape destinate observațiilor pe lungimile de undă infraroșii și submilimetrice. Acesta este și motivul pentru care, directorul observatorului respectiv, Dr. John T. Jefferies, spunea că în ultimul deceniu al secolului nostru, Muntele Mauna Kea va deveni unul dintre centrele terestre principale pentru cercetarea astronomică. O prevedere ce se confirmă o dată cu trecerea timpului.

Încă din anul 1973 au început studiile cu privire la construcția și amplasarea unui telescop cu diametrul de 3,8 m pentru recepționarea radiațiilor infraroșii. Inițial, un astfel de telescop a fost propus de către Jim Ring de la Colegiul Imperial din Londra, iar apoi de către Gordon Carpenter de la Observatorul Regal din Edinburgh (Scoția, Marea Britanie). Este vorba de realizarea unei stații de observații astronomice engleze care să funcționeze pe Muntele Mauna Kea (Hawaii) la latitudinea nordică $\varphi = 19°49'$. Acest telescop a fost inaugurat la 10 octombrie 1979 și este cel mai puternic telescop de acest fel din lume. El este destinat observațiilor în domeniul lungimilor de undă de la un micrometru și pînă la un milimetru ($1\ \mu m \leq \lambda \leq 1$ mm).

Componentele optice ale telescopului de 3,8 m sînt confecționate din sticlă specială, oglinda principală are diametrul de 3,81 m, grosimea la margine este de 28,7 cm, pe cînd la centru grosimea corespunzătoare este de numai 19,2 cm. Această construcție a condus la o greutate a telescopului de numai 6,5 tone în loc de 15 tone cît ar fi avut în cazul unei oglinzi standard. Construcția telescopului s-a realizat în Marea Britanie, iar transportarea lui spre Hawaii a avut loc la sfîrșitul anului 1977.

Stabilitatea telescopului este asigurată printr-un mecanism pneumatic. Este dotat cu o montură „engleză" care cîntărește numai 20 tone pe cînd la un telescop clasic cu oglinda de 3,8 m ar fi fost necesară o montură cu o greutate de aproximativ 250 tone.

Poziționarea telescopului se realizează prin intermediul unui computer, în acest mod fiind asigurată o precizie de circa 5''. Această operație a fost complet automatizată, ea putînd fi realizată și prin telecomandă. Astfel, de exemplu, la data de 6 septembrie 1982, din Edinburgh i s-a transmis telescopului sarcina de a observa steaua HR 8824 cu $m_v =$

5,94 și tipul spectral K5, în vederea efectuării unor cercetări de fotometrie și spectroscopie în infraroșu. Comanda s-a dat printr-un satelit și printr-un centru de calcul din Hawaii. Apoi, postul de telecomunicații de la baza Muntelui Mauna Kea, prin cablu, a transmis comanda respectivă la telescop. Transmiterea acestei comenzi a durat 5 secunde, observarea stelei s-a efectuat în cursul a 3 ore, iar cheltuielile pentru telecomandă s-au ridicat la 30 lire engleze !

La altitudinea de 4 200 m, la care se află stația de observații de pe Muntele Mauna Kea, organismul uman întîmpină anumite dificultăți la persoanele neobișnuite. Acolo presiunea parțială a oxigenului este de numai 10% din cea de la nivelul mării. De aceea, persoanele care vizitează stațiunea respectivă pot suferi de „răul de altitudine", suferință care se manifestă prin reducerea capacității de activitate fizică și intelectuală. Din acest motiv, la altitudinea de 2 800 m, pe coasta muntelui respectiv, pentru aclimatizarea necesară a fost amplasată Stația Hale Pohaku. Totuși, pentru cazul în care ar apărea unele accidente ale căilor respiratorii, la stația de observații se găsesc tuburi cu oxigen pentru acordarea primului ajutor. Este și acesta un motiv pentru care este redus numărul acelora care vizitează Stația de pe Muntele Mauna Kea.

Condițiile deosebit de bune în care se efectuează observațiile pe Muntele Mauna Kea au determinat o creștere a numărului de telescoape amplasate acolo. Dintre acestea relevăm următoarele realizări :

— telescopul de 3,6 m, construit prin colaborarea dintre universitățile din Hawaii, Franța și Canada, și

— telescopul de 3 m care a fost pregătit de NASA.

Pînă la sfîrșitul secolului nostru, pe Mauna Kea se vor mai amplasa vreo 8 telescoape, dintre care menționăm : telescopul de 10 m care este prevăzut să fie realizat de specialiștii de la Universitatea din California, un telescop de 15 m și încă trei telescoape de cîte 25 m fiecare, acestea din urmă fiind în curs de proiectare.

Subliniem încă o dată faptul că pe lîngă dificultățile pe care le ridică construcția propriu-zisă a unui telescop mare pentru recepționarea radiațiilor infraroșii mai apar și problemele legate de răcirea acestora pentru a reduce cît mai

mult efectul radiației de fond. Trebuie luate măsuri speciale pentru înlăturarea radiațiilor perturbatoare care ar putea proveni de la înseși părțile mecanice ale telescopului. Pentru dispozitivele de înregistrare se folosesc detectoare de construcție specială, cum sînt cele din galiu-germaniu. Totuși, pasul hotărîtor în tehnica pentru observațiile în infraroșu s-a efectuat după ce a devenit posibilă construcția detectoarelor răcite cu heliu lichid.

În mod normal, obiectele de pe suprafața Pămîntului, cum sînt telescopul, clădirile, și chiar astronomii, se găsesc la temperatura de circa 300 K. Astfel de obiecte emit radiații cu lungimile de undă $\lambda = 10\ \mu m$. De aceea, astronomul care dorește să înregistreze radiații infraroșii de la o sursă cosmică cu o astfel de temperatură va trebui să fie capabil să facă distincție între radiația căutată și aceea perturbatoare a echipamentului tehnic. Dar pentru realizarea acestui deziderat sînt necesare detectoare cu sisteme de răcire specială.

b) *Observatorul orbital IRAS*

Una dintre cele mai importante realizări tehnice pentru astronomia în infraroșu o constituie lansarea cu succes, la 25 ianuarie 1983, a satelitului artificial al Pămîntului IRAS (Infrared Astronomical Satellite).

Satelitul IRAS a fost proiectat și realizat printr-o colaborare dintre specialiștii englezi, olandezi și americani. La bordul acestuia a fost amplasat un telescop cu diametrul oglinzii principale de 57 cm și deschiderea cîmpului de 30′. Satelitul propriu-zis cîntărea 266 kg, dar telescopul cu accesoriile sale avea aproximativ 800 kg. A fost lansat la altitudinea de 900 km cu perioada orbitală de 1 h 43 m, devenind activ de la data de 31 ianuarie 1983. A funcționat pînă la 21 noiembrie 1983, cu cîteva săptămîni mai puțin decît era prevăzut, din cauza epuizării agentului de răcire.

Satelitul IRAS a fost dotat cu receptoare sensibile la radiațiile infraroșii cu lungimile de undă $8\ \mu m \leq \lambda \leq 120\ \mu m$, temperatura acestora fiind redusă pînă la 2,5 K, în acest scop fiind utilizați 475 l de heliu lichid.

În perioada de activitate, aparatele de la bordul satelitului IRAS au înregistrat o adevărată avalanșă de rezultate de primă importanță pentru astronomie. S-au obținut numeroase date observaționale din prelucrarea cărora au

rezultat informații prețioase cu privire la structura și evoluția Universului.

Observațiile efectuate de IRAS au permis să se întocmească un catalog cu surse infraroșii, printre care se găsesc peste 250 000 de obiecte, circa 99% fiind de natură necunoscută. Dintre acestea, cele mai luminoase sînt IRAS 00193—4 033 și IRAS 22 231—4 529, unde cifrele reprezintă coordonatele ecuatoriale α și δ. Pentru un studiu mai aprofundat al acestor obiecte s-au utilizat plăcile fotografice ale Observatorului ESO (European Southern Observatory), pe care s-au găsit imaginile corespunzătoare cu aspect stelar, dar cu caracteristici spectrale deosebite. Este vorba de prezența unei stele înconjurată de praf circumstelar. Aceste obiecte sînt de vreo 1 000 de ori mai luminoase decît Soarele.

Cu satelitul IRAS au fost observate mii de galaxii infraroșii în care este activ procesul de formare a stelelor. Au fost observați nori obscuri de hidrogen molecular în care sînt scufundate stele de curînd formate. S-au obținut imagini infraroșii ale nucleului și regiunilor îndepărtate ale Galaxiei noastre. S-a pus în evidență prezența unei componente difuze de nori de praf în Galaxie care, alături de norii Cirus infraroșii, este deosebit de importantă pentru cosmologie. Vom reveni asupra unor rezultate obținute de IRAS.

3.3. Cercetarea sistemului solar în diapazonul infraroșu

Pentru a evidenția importanța observațiilor în infraroșu, precum și posibilitățile pe care ni le oferă utilizarea acestui domeniu spectral, prezentăm aici cîteva informații cu privire la Sistemul Solar.

După cum se știe, planetele sînt surse puternice de radiații infraroșii. Analiza spectrală, în mod deosebit a benzilor moleculelor: NH_3, CH_4, H_2O și CO_2 a adus informații cu privire la compoziția chimică, presiunea și distribuția temperaturii în atmosferele planetelor etc.

Radiația infraroșie a *Pămîntului* a fost cercetată cu ajutorul receptoarelor amplasate la bordul unor sateliți artificiali. În acest mod au fost examinați mai mulți parametri fizici, precum și distribuția geografică și variația lor odată cu creșterea altitudinii atmosferice.

Pentru observații în infraroșu o importanță deosebită o prezintă planeta *Jupiter*, împreună cu cortegiul său de sateliți, aici fiind incluse și cercetările efectuate cu aparatele de la bordul navelor Pioneer și Voyager.

Nava Pioneer 10 a fost lansată în martie 1972, iar Pioneer 11 în aprilie 1973. Ele au trecut pe lîngă planeta Jupiter după 22 și respectiv 20 luni.

Navele Voyager 1 și 2 au fost lansate în anul 1977.

Structura atmosferei lui Jupiter a devenit interesantă mai ales din anul 1968 încoace, de cînd s-a constatat că în infraroșu această planetă emite o cantitate de energie mai mare decît aceea pe care o primește de la Soare. Descoperirea energiei interne a planetei Jupiter (1968 — 1969) a fost urmată de un număr mare de măsurători pentru a se evalua cît mai precis cantitatea de energie corespunzătoare. În acest mod s-a stabilit că energia internă este de aproximativ 1,2 ori mai mare decît fluxul de energie solară pe care planeta îl primește de la Soare. Modelele calculate teoretic sînt în acord deplin cu observațiile, aici fiind luate în considerare unele diferențe în compoziția chimică a straturilor care contribuie la fluxul emis.

Telescoapele de la sol pot „pătrunde" cel mai adînc prin atmosfera lui Jupiter pe lungimea de undă $\lambda = 5\ \mu m$, de 10 ori mai mare decît lungimea de undă medie a domeniului vizual. La 5 micrometri există, așadar, o fereastră în atmosfera lui Jupiter. Aceasta este situată la lungimile de undă a două benzi de absorbție ale amoniacului, iar datele observațiilor arată că pe discul planetei Jupiter se proiectează două surse compacte luminoase care nu depind de energia primită de la Soare. Ele sînt atribuite unor surse termice care ar fi localizate în atmosfera planetei, deși natura lor nu este cunoscută destul de bine. Tocmai de aceea, planeta Jupiter a fost supusă unui program de cercetare în domeniul infraroșu. S-au obținut următoarele rezultate:

— ariile „fierbinți" sînt situate puțin mai la nord de ecuatorul jovian;

— pata mare roșie de pe Jupiter nu pare să fie legată de caracteristicile observate pe lungimea de undă $\lambda = 5\ \mu m$.

— caracteristicile detectate prin fereastra de la $\lambda = 5\ \mu m$ nu au fost observate și la alte lungimi de undă;

— cu ajutorul telescopului de pe Mauna Kea s-au cercetat probleme legate de vulcanismul și pata fierbinte de pe satelitul Io al lui Jupiter. Menționăm aici faptul că este vorba de pata albă de natură „vulcanică", descoperită mai înainte cu aparatele de la bordul unei nave Voyager.

Analiza spectrală în infraroșu a stabilit că în atmosfera joviană se găsesc următorii compuși: apă, acetilenă, etan și oxidul de carbon.

Deși în cazul planetei *Saturn* nu dispunem de măsurători atît de precise ca în cazul lui Jupiter, totuși și la aceasta s-a stabilit în mod sigur existența unei surse de energie internă. Cele mai recente măsurători au arătat că planeta Saturn emite o cantitate de energie de circa 1,8 ori mai mare decît aceea pe care o primește de la Soare. Și în acest caz au fost elaborate modele teoretice care sînt în acord cu datele observaționale. Aici, pentru cercetarea contracției gravitaționale s-au luat în considerare proprietățile fizice ale sateliților și inelelor respective. În mod deosebit s-a avut în vedere faptul că atmosfera satelitului Titan este bogată în metan, gheața de metan putînd fi în curs de condensare — contracție gravitațională. De asemenea, densitățile mici și suprafețele întinse de gheață sînt în acord cu prevederile teoretice. Observarea etanului (C_2H_6) pe lungimea de undă $\lambda = 12\ \mu m$ și a metanului (CH_4) la $\lambda = 7,7\ \mu m$ a arătat că planeta Saturn prezintă o iluminare spre marginea discului aparent, fapt determinat de o inversare a temperaturii în atmosfera superioară.

Observațiile efectuate în infraroșu cu aparatele de la bordul lui Voyager 1 arată că, la altitudinea de circa 100 km deasupra norilor lui Saturn, temperatura rămîne aproape constantă în emisfera sudică și scade cu 10 — 15 K o dată cu trecerea de la ecuator spre polul nord. Se observă aici efectele determinate de prezența anotimpurilor.

Din observații s-a constatat că inelele planetare nu conțin metan gazos, nu se evidențiază benzile de absorbție ale acestuia. Este o situație cu totul deosebită față de aceea întîlnită în cazul atmosferei lui Jupiter.

Imaginea lui *Uranus* arată în mod vădit prezența inelelor. A fost observat satelitul Miranda și s-a pus în evidență existența energiei interne.

Planeta *Neptun* este prea puțin strălucitoare pentru a fi accesibilă cercetărilor prin intermediul astronomiei în infraroșu.

La lungimea de undă $\lambda = 2,2$ μm planetele prezintă o strălucire variabilă în decursul timpului, variația respectivă putînd să atingă o amplitudine de circa două magnitudini stelare. Acest fenomen este atribuit formării și disipării unui anumit fel de a reflecta lumina infraroșie. De obicei, cînd în jurul planetelor lipsește ceața, în jurul lor se evidențiază prezența unui disc uniform, dispărînd caracteristicile care indică prezența mai multor inele.

În fine, diversitatea proprietăților atmosferice înalte ale planetelor Saturn, Uranus și Neptun indică deosebiri radicale în structura și circulația curenților la altitudinile corespunzătoare. Pînă în prezent nu s-a dat vreo explicație plauzibilă pentru existența unor astfel de fenomene.

Examinarea suprafețelor sateliților planetelor mari furnizează argumente în favoarea teoriei existenței unui corp compact. Prin observații în infraroșu se pot măsura diametrele celor mai mari sateliți, mai ales în timpul eclipsării acestora de către planeta respectivă sau în cazul ocultării lor de către Lună. În plus, prin oservații spectroscopice se evidențiază anumite constituente dominante ale ghețurilor atmosferice. Rezultate de acest fel au fost înregistrate pentru sateliții Europa și Ganymede, inelele lui Saturn și la încă patru sateliți ai acestei planete.

Prin observații efectuate la lungimea de undă $\lambda = 1,7$ μm s-a constatat că sateliții lui Jupiter, Europa și Ganymede, au o temperatură de circa 100 K. În particular, pentru Ganymede această temperatură este mult mai mică decît aceea determinată pe o altă cale.

Observațiile în infraroșu au furnizat informații valoroase și asupra cometelor. Satelitul IRAS a descoperit cinci comete (din cele 15 care au fost descoperite în perioada lui de activitate). Dintre acestea cometa IRAS-Araki-Alcock a trecut la depărtarea de numai 5 milioane km față de Pămînt; era de magnitudinea $m = 1,5$ cu o coamă de 3° în secțiune și o coadă de circa 400 000 km. A fost cea mai apropiată cometă după cometa Lexel din anul 1770.

Celelalte patru comete descoperite de IRAS aveau strălucirea aparentă de 17 magnitudini și erau cu totul inaccesibile pentru telescoapele de la sol. Recolta bogată a lui IRAS în observarea cometelor este explicată prin aceea că receptoarele corespunzătoare erau sensibile la radiația emisă de praful din jurul cometelor. De aici s-a desprins concluzia că în Sistemul Solar trebuie să existe mult mai multe comete decît se știa pînă acum.

Tot prin observații în infraroșu s-a stabilit și faptul că în jurul cometelor se găsește o cantitate de praf mult mai mare decît aceea cunoscută mai înainte. Astfel, de exemplu, la cometa Tempel 2 s-a detectat o coadă de praf de trei milioane de kilometri, coada respectivă nefiind observată la cele 16 treceri înregistrate anterior în domeniul optic.

În prezent se dispune de observații în infraroșu efectuate asupra unor comete care au trecut pe lîngă Soare la distanța de numai 0,15 unități astronomice[1], printre acestea aflîndu-se și cometa Kohoutek. Din analiza observațiilor s-a ajuns la concluzia că unele modificări în structura sau mărimea granulelor ar putea duce la apariția anumitor modificări în spectrul corespunzător. În schimb observarea cozii anormale a evidențiat legătura existentă între rezultatele furnizate de observațiile în infraroșu și concluziile desprinse din cercetările dinamicii cozilor de praf.

Calculele arată că o coadă anomală poate să apară ca urmare a ejecției de particule mari, cu diametrul de ordinul a 100 micrometri.

S-a constatat că legătura strînsă dintre rezultatele furnizate de dinamica granulelor de praf și cele aduse de observațiile în infraroșu este bazată pe faptul că în cozile cometelor există curenți de particule, acești curenți fiind determinați de anumite erupții care stau la baza generării de praf. Este vorba aici de erupțiile care, foarte probabil, sînt legate de fluctuațiile rapide care au fost înregistrate în infraroșu.

Fărîmițarea nucleului cometei West (1975) a constituit o ocazie bună pentru cercetarea detaliată a fluctuațiilor posibile ale spectrului corespunzător. La lungimea de undă

[1] O unitate astronomică este egală cu distanța medie dintre Soare și Pămînt, ea are valoarea de 150 000 000 km.

$\lambda = 10$ μm s-au detectat variații la scala de timp de ordinul zilelor.

Albedoul cometei West nu s-a schimbat prea mult atît timp cît ea era la o depărtare mai mare de două unități astronomice față de Soare. Această constatare dovedește că gheața de apă prezentă poate acționa ca un nucleu care menține granulele strîns unite pînă cînd sînt aruncate din nucleu.

În cadrul cercetării *asteroizilor* se cunosc observațiile în infraroșu pentru planeta mică Juno. Pe această cale s-a stabilit existența unei forme alungite, diametrul mare fiind de 267 km, iar raportul dintre diametrul mic și cel mare este de 0,845.

Rămînînd încă în cadrul Sistemului Solar, amintim că satelitul IRAS a descoperit un obiect asemănător cu un asteroid, orbita lui trecînd, în medie, la distanța de numai 20,7 milioane km de la Soare. El a fost fotografiat cu telescoapele de la Observatoarele Palomar și Lowel ; apare de magnitudinea $m = 16$ și are un diametru mai mic de 2 km. Acest obiect curios a fost notat 1983-TB.

Asteroidul 1983-TB a fost reperat de astronomul Simon Green de la Universitatea din Leicester (Marea Britanie), la 11. 10. 1983. Are perioada de revoluție în jurul Soarelui de 1,5 ani și este situat printre asteroizii Apollo — un grup de vreo 50 de obiecte care, periodic, intersectează orbita terestră.

Rezultatele obținute din determinarea elementelor orbitale arată că orbita acestui asteroid coincide perfect cu aceea a Geminidelor — un roi de meteori ; activ între 12 și 15 decembrie.

După cum se știe, pentru mulți curenți de meteori se cunoaște și cometa de care sînt atașați. Pentru Geminide pînă acum nu se cunoaștea cometa corespunzătoare — IRAS a descoperit-o. Se pare că obiectul 1983-TB este un rest de cometă, prima cometă „stinsă", dar niciodată observată. Există opinii după care acest obiect ar fi un rest de cometă care și-a pierdut deja învelișul de gheață cu ocazia repetatelor treceri prin apropierea Soarelui.

Cercetarea *prafului din mediul interplanetar* a adus și ea rezultate deosebit de interesante. Două echipe, una japoneză

și alta compusă din cercetători americani, olandezi și englezi au descoperit patru inele de praf în Sistemul Solar. Echipa japoneză a profitat de eclipsa totală de Soare din 11 iunie 1983 pentru a lansa la altitudinea de 30 km, deasupra Indoneziei, un balon echipat cu un telescop pentru infraroșu, cu diametrul de 15 cm și cu o cameră de televiziune foarte sensibilă. Un disc atașat la telescop era destinat mascării luminii difuze care venea de la coroana solară. În timpul celor 3 minute și 50 secunde, cît a durat totalitatea, instrumentul respectiv a observat spațiul din vecinătatea solară la opt lungimi de undă din domeniile vizual și infraroșu. Cu această ocazie s-a pus în evidență existența unui inel în jurul Soarelui. Acest inel este alcătuit din praf, are o temperatură de circa 1 000 K și este situat la distanța de 2,7 miliaone km de la Soare. Probabil că el este o rămășiță a mediului din care s-a format Sistemul Solar cu 4,5 miliarde ani în urmă.

Alături de descoperirea menționată mai sus, satelitul IRAS a cartografiat alte două inele de praf, care orbitează în jurul Soarelui la distanțe cuprinse între 2,3 și 3,3 unități astronomice. Aceste inele sînt subțiri, au temperaturile cuprinse între 150 K și 200 K, și par a fi asociate cu brîul de asteroizi care gravitează între orbitele planetelor Marte și Jupiter. Foarte probabil că acestea au rezultat în urma ciocnirii dintre asteroizi sau ciocnirea asteroizilor cu unele comete. Materia conținută în aceste inele este de ordinul de mărime al masei unui asteroid cu diametrul de un kilometru.

În cadrul observațiilor solare s-a constatat că între fotosferă și cromosferă există o zonă de tranziție care emite radiații pe lungimea de undă $\lambda = 100$ μm. Radiațiile cu lungimile de undă mai scurte de 10 μm ($= 10^{-3}$ cm) provin din fotosferă, pe cînd cele cu lungimile de undă mai mari sînt determinate de cromosferă. Formațiunile cele mai adînci ale atmosferei solare sînt observate în vecinătatea lungimii de undă $\lambda = 1{,}6$ μm.

3.4. Stele infraroșii

Printre stelele care se pot observa în domeniul infraroșu distingem trei categorii : a) stele ordinare cu temperatura de numai cîteva mii de grade, b) stele care, față de observator,

sînt situate undeva dincolo de un nor de materie interstelară și c) stele cu învelișuri circumstelare. Prezentăm aici cîteva dintre cele mai importante caracteristici fizice ale acestora.

După cum am amintit și în paragraful 1.3, maximul energiei radiate de o sursă se deplasează odată cu modificarea temperaturii corespunzătoare. Soarele, cu temperatura superficială de circa 6 000 K, are emisia maximă la $\lambda = 0,5$ µm. Dar pe măsură ce ne referim la stele cu temperaturi mai scăzute, maximele emisiilor respective se deplasează spre infraroșu (vezi și figura 1.4).

La lungimea de undă $\lambda = 2$ µm (20 000 Å), Betelgeuse pare să fie cea mai strălucitoare stea de pe bolta cerească, în timp ce în domeniul optic ea ocupă locul 9 în ordinea strălucirii. Această stea este o supergigantă cu temperatura superficială de numai 3 000 K; ea s-a răcit mult după terminarea arderii hidrogenului, cînd a suferit o dilatare considerabilă.

Steaua Betelgeuse este de culoare portocalie și are diametrul de ordinul de mărime al diametrului orbitei planetei Marte. Observațiile spectroscopice au evidențiat aici prezența unui înveliș circumstelar în expansiune. În ultimii ani, însă, s-au efectuat observații la distanța unghiulară de numai 50″ (= 620 ani lumină) de la centrul stelei și s-a pus în evidență expansiunea învelișului respectiv cu viteza de circa 10 km/s. De aici se ajunge la concluzia că materialul din partea exterioară a învelișului ar fi fost ejectat cu vreo 4 500 ani în urmă.

Cercetări minuțios efectuate asupra stelelor infraroșii arată că aceste obiecte nu au întotdeauna o temperatură atît de scăzută cum rezultă din culorile corespunzătoare. Excesul de radiație în infraroșu poate fi determinat de două cauze principale:

i) În foarte multe cazuri, mai ales la stelele din vecinătatea planului galactic, energia emisă de stele este absorbită de materia interstelară, mai ales radiațiile vizuale și cele ultraviolete.

ii) În anumite cazuri, lumina emisă de unele stele trebuie să treacă prin învelișurile circumstelare care, dacă sînt destul de dense, absorb o bună parte din radiațiile domeniilor vizual și ultraviolet.

Amintim aici și faptul că prezența învelișurilor circumstelare este evidențiată prin deplasarea Doppler a liniilor de emisie determinate de acele părți ale învelișului care se găsesc la stînga și la dreapta „discului" stelar. Într-un astfel de caz, liniile de emisie din stînga și din dreapta stelei au viteze radiale de semne opuse, după cum, din cauza rotației axiale a stelei, o regiune se apropie sau se îndepărtează în raport cu observatorul. Este vorba de efecte dinamice cum sînt cazurile stelelor Wolf-Rayet sau stelele de tipul P Cygni (vezi figura 4.2.).

La Observatorul de pe Mauna Kea, prin intermediul spectrofotometriei la lungimea de undă $\lambda = 3,28$ µm, la unele stele Wolf-Rayet s-a detectat o linie de emisie foarte intensă, aceasta fiind atribuită carbonului de trei ori ionizat (C IV). Foarte probabil că prezența acestei linii este o caracteristică comună pentru sursele cu excitație puternică.

Așa cum am mai amintit și la începutul acestui capitol, o stea cu exces de radiație în infraroșu este și R Monocerotis. Aceasta este situată în interiorul nebuloasei NGC 2 261 pe care Hubble o asemăna cu o cometă. Steaua este scufundată într-o gogoașă care absoarbe lumina stelară și o reemite sub formă de radiație infraroșie.

În legătură cu stelele cu învelișuri amintim că, printre acestea, unele sînt foarte tinere, iar altele foarte bătrîne, diferența respectivă fiind evidențiată prin conținutul de elemente grele din învelișurile considerate. S-a constatat că unele stele tinere sau protostele sînt asociate cu nori moleculari sau nori de hidrogen ionizat, descoperire de mare importanță pentru problemele de evoluție stelară.

Printre stelele puternic evoluate putem aminti stelele supergigante de tipul Mira Ceti, de clase spectrale M și S sau stelele carbonice. Distribuția energiei acestor stele se poate interpreta prin radiația fotosferei unui corp negru cu o temperatură de circa 2 000 K, plus un exces de radiație în banda delimitată de lungimile de undă dintre 8 µm și 14 µm. În unele cazuri, la $\lambda = 20$ µm se detectează radiații care evidențiază prezența unor particule de silicați: Mg_2SiO_4 și Al_2SiO_5.

Întrucît datele spectroscopice arată că majoritatea stelelor din categoria celor puternic evoluate pierd masă și că silicații se pot concentra în spațiul circumstelar corespun-

zător, cea mai probabilă interpretare a excesului de radiație infraroșie[1] constă în aceea că aici se elimină o cantitate de substanță care va alcătui un înveliș circumstelar din particule de silicați. La astfel de obiecte, radioastronomii au descoperit radiația hidroxilului (OH).

Ca un exemplu de stea din categoria celor amintite mai sus poate fi menționată sursa IRC +10°216, notația respectivă arătînd poziția 216 din zona de declinație de +10° pentru sursa infraroșie din catalogul întocmit de G. Neugebauer și R. Leighton, o stea de carbon cu temperatura de 2 000 K și cu înveliș circumstelar în care se găsește grafit.

Pe plăcile fotografice, IRC + 10°216 se prezintă ca un obiect întins cu magnitudinea aparentă $m = 18,0$, radiația maximă avînd-o la $\lambda = 5$ μm. Această sursă radiază ca un corp cu luminozitatea variabilă, cu perioada de circa 600 zile.

Prin observarea ocultației de către Lună a sursei IRC +10°216 s-a evidențiat prezența unui înveliș circumstelar cu raza medie de circa 60 unități astronomice, rezultat confirmat și prin observațiile radio pe lungimile de undă milimetrice. În plus, acestea din urmă pun în evidență un halo extins, de vreo 345 de ori mai întins decît învelișul circumstelar, la obținerea acestui rezultat contribuind recepționarea radiației emisă de CO. Afară de aceasta, au mai fost detectate moleculele: CN, HCN, SiS, SiO și HC_3N.

Observarea liniilor moleculare arată că învelișul circumstelar al sursei IRC+ 10°216 se dilată cu viteza de 12 km/s.

*

Stelele de tipul S sînt deosebit de importante pentru a fi observate în infraroșu, importanța decurgînd din faptul că în spectrele corespunzătoare s-au găsit multe anomalii.

Deși mai puțin numeroase decît stelele de tipul M sau decît stelele carbonice, stelele de tipul S sînt deosebit de importante pentru cercetarea proceselor de nucleosinteză. În spectrele acestor stele s-au identificat liniile atomice ale unor elemente chimice rare și instabile. Totuși, în spectrele acestor stele multe caracteristici proeminente rămîn încă neexplicate.

[1] Excesul de radiație în infraroșu se consideră depășirea față de valorile parametrilor corpului negru.

Dintre stelele S, înregistrate în catalogul cu surse infraroșii, circa 85% sînt suspecte a fi variabile, majoritatea acestora fiind de tipul Mira Ceti, iar caracteristicile problematice se remarcă în fazele de strălucire minimă.

*

Printre rezultatele furnizate de astronomia în infraroșu, prin cercetarea stelelor variabile, mai amintim că, în anul 1950, steaua HM Sagittae avea magnitudinea $m = 12$, pentru ca în 1977 să aibă $m = 14$. Această stea devine importantă deoarece în spectrul ei s-au detectat linii de emisie în infraroșu, linii asemănătoare cu cele ale nebuloaselor planetare.

La stelele variabile de tipul Mira Ceti, liniile de emisie susțin teoria pulsațiilor, pe cînd cele de absorbție o contrazic. Pentru a lămuri totuși această situație s-au efectuat observații la lungimi de undă mari. Astfel, prin observațiile de la lungimile de undă milimetrice, pe microunde și în infraroșu s-au obținut informații despre structura atmosferelor acestei clase de stele variabile. În astfel de cazuri emisia maximă are loc în infraroșul apropiat, iar la $\lambda = 2$ μm s-au înregistrat variații cu amplitudini între una și două magnitudini. Spectrele acestor stele pun în evidență două componente: una fierbinte și alta rece. Componenta fierbinte are temperatura de 3 000 K și s-au detectat liniile pentru CO și HO, pe cînd componenta rece are o temperatură de 1 000 K și poate fi localizată într-un înveliș circumstelar. Liniile moleculelor SiO și HO sînt caracteristice maserilor și pun în evidență importanța cercetării stelelor reci.

*

Un alt grup de stele, la care radiația infraroșie aduce date interesante, îl constituie novele galactice (de pildă Nova Serpentis 1970). La acestea, în timpul erupțiilor este ejectată o însemnată cantitate de materie care, cu timpul, contribuie la formarea norului de praf circumstelar. Aici, excesul de radiație infraroșie este sesizabil abia după 50 de zile de la erupție, acesta fiind timpul necesar pentru ca materia ejectată, care se mișcă spre exterior cu viteza de 1 000 km/s, să se poată condensa în norul circumstelar. Radiația roșie ajunge la intensitatea maximă peste 90 zile de la

erupție, cînd temperatura a ajuns la numai 900 K. Pe urmă, intensitatea radiației și temperatura materiei din înveliș descresc și mai mult.

Din compararea rezultatelor obținute, atît pentru nove cît și pentru stelele cu ritm constant al pierderii de masă, se ajunge la concluzia că o parte din praful interstelar provine chiar de la stele.

Informațiile obținute prin cercetarea stelelor în infraroșu sînt numeroase și nu le putem prezenta pe toate. Totuși, nu putem încheia acest paragraf fără a aminti cîteva din rezultatele furnizate de IRAS.

Încă în timpul operațiilor de calibrare a detectoarelor, satelitul IRAS a pus în evidență existența unui nor de praf în jurul stelei Vega, cu dimensiunile cuprinse între cele ale grăunțelor de nisip și cele ale unor asteroizi. Se pare că aceste particule sînt, în principal, alcătuite din hidrogen. Raza norului este de aproximativ 80 unități astronomice, are o temperatură de circa 90 K, iar masa totală este evaluată la vreo 10^{-3} mase solare.

Avînd în vedere faptul că Vega este o stea relativ tînără în raport cu Soarele (10^9 ani), foarte probabil că satelitul IRAS a descoperit aici un sistem planetar în curs de formare.

O descoperire asemănătoare a efectuat IRAS în jurul stelei α Pisces Austrinis (Fomalhaut), în jurul căreia s-a detectat un alt sistem planetar în curs de formare.

În total, IRAS a descoperit materie „rece" în jurul a patru stele din Galaxie, materie care este presupusă a reprezenta sisteme planetare în curs de formare.

3.5. Nebuloase galactice

În cazurile în care învelișurile stelare sînt destul de dense, ele absorb o cantitate considerabilă din lumina stelei centrale, se încălzesc și emit radiații în infraroșu. Se formează astfel *nebuloasele infraroșii* care au o temperatură de circa 1 000 K. Este vorba de niște nori de praf care sînt opaci pentru radiațiile optice, dar rămîn transparenți pentru cele infraroșii. Așadar, avem de-a face cu nebuloase gazoase care sînt obiecte luminoase „întinse", dar care se pot grupa în: nebuloase planetare și nebuloase difuze sau nori de hidrogen ionizat (HII).

i) *Nebuloasele planetare*. În cursul evoluției stelare, stelele de mase moderate ajung la un anumit stadiu cînd, datorită condițiilor fizice interne, trecînd printr-o fază de instabilitate, învelișul stelar se dilată mult și ia forma unui inel sau a unei gogoașe în jurul stelei. Această gogoașă este iluminată de steaua din interior și este numită nebuloasă planetară. Este o denumire improprie introdusă de W. Herschel care asemăna formațiunea respectivă cu discul aparent al unei planete.

În Galaxie se cunosc peste 1 000 de astfel de obiecte și s-a evaluat că, aici, numărul lor ar fi de ordinul a 20 000.

Așadar, nebuloasele planetare reprezintă învelișuri stelare gazoase, cu un înalt grad de ionizare care, în trecutul nu prea îndepărtat, au fost ejectate din steaua respectivă. Steaua centrală de aici se află într-un stadiu avansat de evoluție, dar este încă foarte fierbinte ($T \approx 5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ K). Substanța din înveliș se dilată cu viteza de ordinul a 25 km/s, are o masă cuprinsă între 0,1 și 1,0 mase solare, vîrsta învelișului fiind de vreo 10^4 ani.

Radiația roșie a nebuloaselor planetare este emisie termică a unor „granule" de grafit care au fost încălzite la temperatura de 200 K de către fotonii razelor ultraviolete care vin de la steaua centrală. La lungimile de undă 8 μm $\leq \lambda \leq$ 14 μm, excesul de radiație infraroșie este de 25 — 160 ori mai mare decît cantitatea de energie radiată prin intermediul tranzițiilor liber-libere. Se pare că există o legătură între energiile emise în infraroșu și domeniul undelor radio.

Printre nebuloasele planetare mai deosebite amintim aici obiectul NGC 7027 a cărei radiație în infraroșu este caracterizată prin temperatura de 250 K. Este vorba de cea mai luminoasă sursă de acest fel unde praful coexistă alături de gazul ionizat.

Unele obiecte din categoria nebuloaselor planetare infraroșii pot avea aspecte destul de ciudate. Astfel, de exemplu, nebuloasa cu notația CRL 2688 are forma asemănătoare cu un ou și este socotită a reprezenta o verigă de legătură între stele și nebuloasele planetare.

Satelitul IRAS a descoperit cinci nebuloase planetare.

ii) *Nebuloasele infraroșii difuze* — regiuni de hidrogen ionizat — sînt aglomerări de plasmă interstelară fierbinte, adesea de formă asimetrică, situate în jurul unor stele de tipurile spectrale O sau B, sau grupe de astfel de stele. Este vorba de stele fierbinți ($T \sim 10^5$K) cu luminozitate mare care s-au format, nu demult, din substanța nebuloasei respective.

Astrofizicienii discută relativ de mult timp existența stelelor fierbinți (de tipul B) în norii de praf unde hidrogenul se găsește sub formă de molecule H_2. Astfel de stele emit energie în ultraviolet, această emisie contribuind la apariția zonelor de hidrogen ionizat (H II), care devin observabile în infraroșu mai curînd decît în domeniul optic.

La sfîrșitul anilor '60, observațional s-a constatat că foarte multe regiuni de hidrogen ionizat emit o mare fracțiune din energia lor pe lungimea de undă $\lambda = 100$ μm și că în domeniul lungimilor de undă dintre 5 μm și 100 μm radiația infraroșie observată o depășește pe aceea prevăzută prin tranzițiile liber-libere. Acest exces este interpretat ca o radiație „rece" a prafului existent în gazul ionizat.

Un grup de astronomi de la Heidelberg au studiat, în infraroșul fotografic, o serie de regiuni de H II și au găsit mai multe stele care sînt invizibile în domeniul optic, dar care ionizează gazul respectiv.

Sursele infraroșii legate de regiunile de H II pot aparține la una din următoarele clase : a) regiuni compacte de hidrogen ionizat, b) surse scufundate în nori moleculari legați de regiunile de H II și c) surse legate de meserii OH/H_2O.

În spațiul interstelar, alături de nori de praf și gaz ionizat există și nori alcătuiți din molecule. Aceștia, fiind de un milion de ori mai masivi decît Soarele, sînt cele mai masive formațiuni din Galaxie. Astfel de obiecte sînt detectabile numai la lungimi de undă mari. Pe lungimea de undă $\lambda = 2,6$ mm astfel de nori au fost detectați prin radiația emisă de CO.

Norii moleculari sînt caracterizați printr-un conținut de molecule care emit radiații și în infraroșu, dintre acestea molecula H_2 fiind cea mai frecventă, iar radiația ei este determinată de încălzirea provocată de unda de șoc care vine de la stelele tinere a căror temperatură este de abia 2 000 K.

Un exemplu de regiune de H II este adesea citată nebuloasa optică IC 1795, care este o radiosursă galactică puternică situată în brațul spiral *Perseus*, la numai 3 kpc de la Soare, ea putînd fi întîlnită și sub notația W 3. Această sursă are un conținut bogat în praf, iar analiza radiației radio pune în evidență prezența mai multor componente. Dintre acestea W 3 (A) este observată și în infraroșu și are notația IRS 1. Nu demult s-a descoperit și sursa IRS 2.

La observatorul de pe Mauna Kea s-au descoperit vreo 24 surse noi în infraroșu apropiat. Ele sînt bănuite a fi membre ale unei asociații de stele care s-au format recent într-un nor molecular din Orion. Acest lucru a fost posibil datorită faptului că spectroscopia în infraroșu dispune de posibilități de a detecta unele linii și benzi moleculare care corespund apei (H_2O), hidroxilului (OH), moleculei de acetilenă, oxidul de carbon (CO) și alte molecule mai complexe.

Prin observații în infraroșu s-a constatat că regiunea Monocerotis R_2 este asociată de unele surse infraroșii, printre care se găsește și maserul H_2O. De aici rezultă concluzia că unele dintre aceste surse au o vîrstă mai mică decît 10^3 ani. În plus, aici există și stele bătrîne, de circa 10^7 ani, fapt care arată că formarea stelelor, în această regiune, a fost declanșată la epoci diferite. De această descoperire observațională va trebuie să țină seama orice teorie care se ocupă cu evoluția stelară.

Ca un exemplu de regiune în care stelele s-au format la epoci diferite poate fi citată Nebuloasa Ou (CRL 2688), la care studiile fotometrice au pus în evidență existența unei stele de tip tîrziu, care mai este înconjurată de un nor de praf în formă toroidală. S-au găsit stele de vîrste diferite.

Un alt exemplu de regiune complicată de hidrogen ionizat (H II) este nebuloasa din Orion, M 42, situată la aproximativ 500 pc de la Soare. Aici, prin intermediul observațiilor radio s-au pus în evidență două regiuni de radiație intensă. În infraroșu, aceste regiuni au fost observate cu ajutorul unui telescop plasat în nacela unui balon, pe lungimea de undă $\lambda = 80$ μm. Pe această cale s-a detectat un nor de materie interstelară în care are loc formarea stelelor. Regiunea de intensitate radio maximă din partea de sud coincide cu stelele

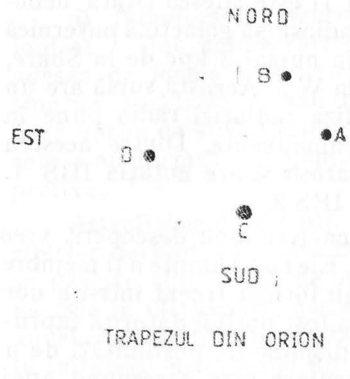


Fig. 3.2. Aspectul configurației cunoscută sub denumirea de Trapezul din Orion.

Trapezului din Orion (vezi fig. 3.2). Aceste stele produc iluminarea prafului respectiv [1].

Cea de-a doua regiune de intensitate radio maximă este situată în partea de nord a nebuloasei, la nord-vest de stelele Trapezului. Este vorba de o regiune cunoscută sub denumirea de *nebuloasa Kleinmann-Low* (K—L) care pare a fi iluminată de stelele care se găsesc în interiorul ei. Masa celor două regiuni radio este de circa 30 mase solare.

În apropiere de nebuloasa K—L și de stelele din Trapez se găsește o regiune de hidrogen ionizat cunoscută sub denumirea de M 42 în spectrul căreia au fost identificate liniile oxigenului dublu ionizat (O III) la $\lambda = 55$ și 88 μm, ale nitrogenului ($\lambda = 57$ μm) și sulfului ($\lambda = 19$ și 33 μm).

În interiorul nebuloasei K—L și în jurul acesteia se observă un mare număr de linii de emisie moleculară, care demonstrează faptul că acolo poate să existe o activitate violentă. S-a detectat scurgerea unor formațiuni de materie cu viteza de peste 50 km/s, în direcția nord-vest — sud-est. Astfel de fenomene sînt caracteristice regiunilor în care se produce formarea stelelor și, probabil, reprezintă o fază în evoluția stelelor masive spre secvența principală.

[1] În figurile 3.1a, 3.1b, regiunea din vecinătatea stelei *O* Orionis este ocupată de faimoasa Nebuloasă din Orion. În interiorul cercului punctat se găsește și regiunea de hidrogen ionizat cu notația M42. Steaua *O* Orionis este o stea multiplă, cu aparate modeste dinstingîndu-se componente O_1 și O_2. Apoi, privită cu aparate mai puternice, O_1 se prezintă ca o stea multiplă, patru componente fiind mai importante. Este vorba de *Trapezul din Orion* care este prezentat în figura 3.2. Aici distanța dintre stelele A și C este de 13" (secunde de arc). Strălucirea stelei A variază între magnitudinile 6,5 și 7,7 Steaua B este o stea dublă cu eclipse și este cunoscută sub notația BM Orionis. Stelele C și D au magnitudinile 5,1 și respectiv 6,7.

Se presupune că emisia în infraroșu a complexului din Orion provine de la stelele nou formate care mai sînt, încă, învelite într-un fel de gogoașă (cocoon) de praf. Astfel de stele s-au format într-o regiune în care a avut loc ciocnirea dintre doi nori de praf cosmic. Dacă această ipoteză este corectă, stelele infraroșii observate în acest complex sînt printre cele mai noi formațiuni ale cerului văzut de pe Pămînt. Ele ar avea vîrsta de numai cîteva mii de ani.

iii) *Obiectele de tipul Becklin-Neugebauer*

În nebuloasa din Orion, la 12'' spre nord de nebuloasa K—L, s-a descoperit așa-numitul obiect Becklin-Neugebauer, cunoscut sub notația B—N. Acesta emite cea mai mare parte din energia sa la lungimea de undă $\lambda = 5$ μm și rămîne invizibil pentru astronomia optică. Se comportă ca un corp negru cu temperatura de 650 K.

Pe lîngă faptul că obiectul B—N are o strălucire variabilă, el este remarcabil și prin aceea că radiația sa în infraroșu provine nu numai de la el, ci și de la o mică regiune nebulară care îl înconjoară. Aceasta din urmă are o temperatură de numai 150 K.

De la descoperirea lui, din 1976, în legătură cu obiectul B—N s-au emis mai multe ipoteze. Se consideră, de exemplu, că aici ar exista o stea de tipul F, puternic înroșită, situată într-un nor de molecule, fapt care determină o extincție (absorbție) de circa 80 magnitudini. Lumina acestei stele este termalizată de către stratul gros de praf înconjurător.

În ultimii ani, pe lungimile de undă cuprinse între 2 și 20 μm s-au descoperit vreo 34 de obiecte de tipul B—N, pentru acestea fiind utilizată noțiunea de *protostea*. Aceste descoperiri au contribuit la elucidarea anumitor condiții în care se desfășoară procesul de formare a stelelor. Într-adevăr, obiectele B—N se găsesc în faza de presecvență principală și sînt situate în vecinătatea unor regiuni de H II care conțin nori moleculari.

De obicei, aceste obiecte sînt asociate cu maserii OH și H_2O, deși legătura fizică încă nu este explicată.

Obiectele B—N sînt surse compacte de radiații infraroșii, diametrele lor aparente fiind mai mici de o secundă de arc. Au un înveliș gros de praf, fapt pentru care corespondentul lor optic nu a fost detectat. Se pare că ar fi vorba de mai multe obiecte scufundate într-un înveliș comun de praf.

Considerațiile teoretice privind problemele de evoluție stelară arată că trebuie să existe obiecte intermediare între clasa B—N și regiunile de H II, dar care, observațional, încă nu au fost detectate.

Pentru $\lambda > 8\ \mu m$ fluxul de radiație al obiectelor B—N crește puternic o dată cu lungimea de undă și rămîne aproape constant pentru $10 < \lambda < 20\ \mu m$. Luminozitățile maxime sînt de ordinul de mărime a $10^2 - 10^5\ L_\odot$.

Spectrul continuu al obiectelor B—N prezintă benzi de absorbție la $\lambda = 10$ și $18\ \mu m$, aceste benzi fiind atribuite unor silicați care s-ar găsi în substanța din învelișulile corespunzătoare. Tot în favoarea acestei explicații vine și banda de absorbție de la $\lambda = 3{,}1\ \mu m$, precum și unele cercetări de laborator privind analiza meteoriților. Cea de-a doua bandă de absorbție, de la $\lambda = 20\ \mu m$, a fost detectată, deocamdată, numai la prototipul acestei clase de obiecte (obiectul B—N).

Au fost detectate spectre de linii de recombinare ale hidrogenului, iar în vecinătatea mai îndepărtată a obiectelor B—N s-au găsit linii de emisie care aparțin hidrogenului molecular.

În vecinătatea obiectelor B—N s-au găsit stele variabile de tipul T Tauri și obiecte de tipul Herbig-Haro a căror observare în infraroșu este foarte importantă.

— Steaua T Tauri este reprezentanta unei clase de stele variabile care sînt înconjurate de învelișuri circumstelare, variația strălucirii fiind determinată de unele fluctuații ale densității materiei din învelișul corespunzător. Dintre acestea, cel mai bine a fost studiată steaua HR 5999 din constelația Scorpius, amplitudinea de variație a strălucirii respective fiind de aproximativ o magnitudine.

— Obiectele Herbig-Haro sînt un fel de nebuloase mici cu nuclee centrale care, în infraroșu, se prezintă ca niște surse punctuale. Există păreri că aceste surse punctuale ar fi

stele foarte tinere, de tipul T Tauri; totuși trebuie să avem în vedere faptul că, din punct de vedere evolutiv, stelele T Tauri reprezintă o fază mai avansată decît obiectele Herbig-Haro.

În anul 1983, pe lungimile de undă infraroșii, cu ajutorul telescopului de pe Mauna Kea, s-a constatat că T Tauri este o stea dublă. Companionul acesteia, o stea în curs de formare, este scufundat într-un nor dens de praf, fapt pentru care el nu poate fi observat la lungimile de undă ale domeniului optic, sau și mai scurte. Se presupune că acest companion ar fi o protoplanetă în devenire. Raza orbitei companionului este evaluată la 145 unități astronomice, sistemul T Tauri aflîndu-se la depărtarea de 520 ani lumină. Norul de praf în care este scufundat T Tauri reprezintă o rămășiță a mediului primar din care s-au format acestea.

Observațiile în infraroșul îndepărtat furnizează date importante cu privire la structura și proprietățile fizice ale regiunilor în care se derulează procesul de formare a stelelor. Prin astfel de observații, mai ales prin studiul asociațiilor de stele OB și al regiunilor de nori moleculari și hidrogen ionizat, s-a ajuns la următorul tablou privind formarea stelelor.

Un nor de gaz protostelar cu densitatea de circa 10^4 atomi de hidrogen pe cm^3 începe să colapseze, în regiunea centrală a lui formîndu-se astfel o „stea embrion" — o protostea.

Cu timpul, masa embrion captează masa de la mediul din jur. Se formează o gogoașă de praf care înconjură protosteaua. Masa astfel captată va determina un fel de contracție gravitațională a stelei — un colaps, iar energia potențială este transformată în energie termică care va încălzi materia din înveliș pînă la temperatura de 1 000 K.

Radiația emisă de protostea va fi absorbită prin învelișul gazos, va ioniza gazul respectiv și va „sufla" afară o parte din cantitatea de gaz și praf. Se va forma astfel o a doua gogoașă în stare de expansiune. În aceste condiții atmosfera stelară se „curăță" și începe să devină transparentă, primele observații putînd fi efectuate în infraroșu.

Procesul de ionizare a gazului din gogoașă determină formarea de nori de hidrogen ionizat (H II) care, așa cum am menționat mai înainte, sînt strîns legați de regiunile în care se formează stele.

Pe măsură ce colapsul mărește temperatura din interiorul protostelei, aceasta din urmă evoluează treptat spre stadiul de stea propriu-zisă. Cînd temperatura a crescut destul de mult, se declanșează reacțiile termonucleare, iar steaua ajunge la secvența principală.

În timp ce în interiorul stelei se desfășoară arderea termonucleară a hidrogenului, steaua devine din ce în ce mai fierbinte și poate „sufla" afară praful rezidual. Atmosfera respectivă devine transparentă, iar steaua poate fi observată în domeniul vizual și ultraviolet. Apoi, în urma transformării hidrogenului în heliu, nucleul va fi supus unui nou colaps, fapt care determină expansiunea straturilor exterioare. Steaua ajunge la stadiul de gigantă roșie, expansiunea straturilor exterioare fiind aceea care determină formarea unui nor de praf în jurul stelei.

iv) *Norii de praf obscur* reprezintă aglomerări de materie interstelară prin care nu pot trece radiațiile emise de sursele situate dincolo de aceștia. Prezența lor este evidențiată de reducerea considerabilă a numărului de imagini stelare. În ultimul timp, cercetarea unor astfel de nori prezintă interes pentru studiul procesului de formare a stelelor. Acest interes este determinat de faptul că radiațiile infraroșii au o putere mai mare de traversare și ne aduc informații privind stările fizice din acele regiuni. Astfel, de exemplu, pe lungimea de undă $\lambda = 2\ \mu m$, în remarcabilul nor obscur situat puțin spre sud de steaua ρ Ophiuchi s-a descoperit o asociație de vreo 67 surse punctiforme care sînt puternic ecranate de materia absorbantă. Este vorba de niște surse infraroșii care aparțin ramurei superioare a secvenței principale a roiurilor stelare tinere, de numai cîteva milioane de ani. Prin urmare, cercetarea norilor obscuri arată că procesul de formare a stelelor se derulează în mod continuu. În norii obscuri s-au găsit stele cu vîrstele între 10^4 și 10^7 ani.

Un nor obscur observat de IRAS este Chameleon I unde au fost reperate vreo 70 de obiecte tinere care sînt surse de radiații în infraroșu.

O altă țintă pentru IRAS a fost un nor mic din constelația Perseus, cunoscut sub notația Barnard 5. Aici au fost identificate vreo patru obiecte „nou născute", fiecare dintre acestea avînd masa de circa o masă solară. În nucleul dens al lui Barnard 5 au fost reperate două surse compacte.

În nebuloasa Lynds 1551, IRAS a descoperit o regiune în care „acum" se nasc stele de mase mici.

În norii obscuri s-au detectat obiecte cu aspect stelar, înconjurate de învelișuri de gaz și praf care sînt încălzite, de către corpurile centrale, pînă la temperaturi de 30—800 K.

v) *Nebuloasa Crab* este prima sursă radio pentru care s-a identificat corespondentul optic, pentru radiația acestuia fiind stabilită natura sincrotron. În centrul acesteia se găsește pulsarul radio care a fost observat la toate lungimile de undă.

Observînd Nebuloasa Crab, IRAS a stabilit o slăbire a intensității radiațiilor, atunci cînd observațiile se efectuează pe lungimi de undă din ce în ce mai mari. S-a găsit un exces de radiație infraroșie determinat de prezența prafului din interiorul nebuloasei, exces de natură termică.

Pulsarul din Nebuloasa Crab (NP 0532) a fost observat cu telescopul Hale de 5 metri și la lungimile de undă $\lambda = 1{,}6$; 2,2 și 3,5 μm. La $\lambda = 2{,}2\ \mu m$ forma impulsurilor coincide cu aceea observată în optic.

vi) *Norii cirus infraroșii* reprezintă o altă descoperire a satelitului IRAS. Aceste formațiuni de materie interstelară nu erau cunoscute mai înainte, conțin mari cantități de grafit, ei fiind denumiți astfel din cauza asemănării cu norii cirus din atmosfera terestră.

Radiațiile norilor cirus infraroșii sînt determinate de radiația puternică ultravioletă a unor stele care produc încălzirea lor pînă la temperatura de 25—30 K. Ei fac parte din Galaxie, dar nu au o distribuție preferențială. După unele cercetări s-ar părea că acești nori sînt legați gravitațional de Soare, deși se găsesc la distanțe de peste 1 000 unități astronomice față de el.

În prezent se consideră că norii cirus infraroșii ar fi o gogoașă de materie interstelară care înconjură sistemul solar. În schimb, alți cercetători apreciază depărtarea acestor nori la ordinul de mărime de 600 ani lumină.

3.6. Structura Galaxiei în diapazonul infraroșu

Praful interstelar care se găsește între noi și centrul Galaxiei determină o absorbție „totală" a radiațiilor optice, pe

cînd radiaţia roşie este mai puţin afectată. De aceea, cercetările privind structura sistemului nostru stelar s-au dezvoltat considerabil o dată cu introducerea tehnicii pentru astronomia în infraroşu.

La lungimile de undă 40 $\mu m < \lambda < 200$ μm, planul galactic apare ca o bandă de emisie ce se întinde pe mai mult de 30° în longitudine.

Cu ajutorul aparatelor de la bordul unui balon s-au efectuat observaţii pe lungimile de undă $\lambda = 2{,}4$ μm şi 3,4 μm şi s-au detectat regiuni de formare a stelelor în interiorul braţelor spirale, acest rezultat fiind obţinut mai ales din cercetarea roiurilor tinere. S-a pus în evidenţă concentrarea surselor infraroşii spre planul galactic.

Din observaţiile efectuate la lungimile de undă 50 $\mu m < \lambda < 300$ μm s-a constatat că regiunea centrală a Galaxiei coincide cu radiosursa Sagittarius A. Dimensiunile acestei regiuni, precum şi intensitatea înregistrată a radiaţiei, depind de lungimea de undă a domeniului spectral utilizat. Astfel, de exemplu, în domeniul delimitat de 80 μm şi 120 μm luminozitatea părţii centrale a Galaxiei are valoarea de $10^9 L_\odot$, ceea ce reprezintă circa 1% din luminozitatea întreagă a sistemului nostru stelar. În figura 2.9 este prezentată schematic structura părţii centrale a Galaxiei .

În domeniul spectral 9,03 $\mu m < \lambda < 9{,}27$ μm, cu telescopul de la Observatorul Cerro Tololo s-au efectuat observaţii asupra sursei Sagittarius A-vest din centrul Galaxiei şi s-au evidenţiat trei obiecte cu magnitudinile aparente : $m_1 = 18{,}7$; $m_2 = 19{,}5$ şi $m_3 = 19{,}7$. Este vorba de obiectele cunoscute sub notaţiile : FRS-1, FRS-2 şi FRS-3, care nu erau cunoscute mai înainte. De altfel, se pare că aici este prezentă o îngrămădire de stele uriaşe de tipurile spectrale K5—MO, sau o regiune de H II cu densitate foarte mare.

Din combinarea rezultatelor obţinute în infraroşu şi în alte domenii spectrale, pentru structura părţii centrale a Galaxiei se conturează următorul tablou (vezi figura 2.9) :

Bulbul central are, în medie, raza $R = 1{,}5$ kpc şi luminozitatea $L = 3.10^9 L_\odot$, mărimi comparabile cu cele găsite pentru cazul nebuloasei din Andromeda (M 31). Masa prafului din această regiune este apreciată la circa 10^5 mase solare.

Observaţiile radio şi cele din infraroşu arată că în regiunea centrală a Galaxiei trebuie să se găsească aglomerări de materie interstelară sub formă de nori de H II şi nori moleculari în interiorul cărora se derulează procesul de formare a stelelor.

Distribuţia spaţială a radiaţiei pe lungimile de undă infraroşii, radiaţia radio cu spectrul variabil şi radiaţia de la CO se corelează, dar sensul unei astfel de corelaţii nu este înţeles destul de bine.

Prin observaţiile în infraroşul îndepărtat, centrul galactic se prezintă a fi asemănător cu regiunile întinse de H II, cu maximul de intensitate în vecinătatea lui $\lambda = 100$ μm, pe cînd la lungimile de undă 10 $\mu m \leq \lambda \leq 20$ μm se remarcă prezenţa silicaţilor.

Pe harta infraroşului îndepărtat (40 $\mu m < \lambda < 350$ μm) apar multe detalii cunoscute deja din observaţiile radio.

3.7. Astronomia extragalactică în infraroşu

Dezvoltarea vertiginoasă a tehnicii instrumentale a produs o adevărată explozie în astronomia extragalactică, în mod deosebit fiind îmbogăţite cunoştinţele noastre despre nucleele galaxiilor. S-a stabilit că o fracţiune importantă din obiectele extragalactice sînt surse puternice de radiaţie în infraroşu. Astfel, de exemplu, pot fi amintite : nuclee ale galaxiilor normale (cele asemănătoare cu Galaxia), galaxii care explodează (M 82 ?), galaxii Seyfert (NGC 1068), galaxii N (3C 120) şi quasarii (3C 273). Luminozităţile infraroşii ale galaxiilor sînt cuprinse între 10^{37} şi 10^{45} ergi/s, iar numărul mare de galaxii cu emisie în infraroşu arată că energia respectivă este eliberată în timpul unei fracţiuni destul de mare din timpul de existenţă corespunzător. Iată de ce, una dintre cel mai importante probleme, care preocupă astăzi pe astronomi, este şi cea care se referă la natura radiaţiilor infraroşii ale galaxiilor.

i) *Observarea galaxiilor în infraroşu* în vecinătatea lungimii de undă $\lambda = 2$ μm a arătat că majoritatea fluxurilor de energie înregistrate pot fi interpretate ca radiaţie stelară a cărei intensitate creşte odată cu creşterea lungimilor de undă. Observaţiile efectuate la $\lambda = 10$ μm scot în evidenţă prezenţa unor grupe de galaxii cu luminozităţi deosebit de

mari, pe cînd observațiile de la $\lambda = 20\ \mu m$ arată că există unele galaxii a căror energie maximă este emisă în infraroșul îndepărtat. Se cunosc peste o sută de galaxii cu emisie de energie în infraroșu care au fost observate la $\lambda = 10\ \mu m$, șapte au fost observate la $\lambda = 20\ \mu m$ și numai trei la $\lambda = 40\ \mu m$.

Aparent, galaxiile eliptice conțin puțin praf și gaz, pe cînd cele spirale sînt bogate în astfel de materie. Mai multe galaxii eliptice cercetate în infraroșu s-au dovedit a avea un puternic exces de radiație infraroșie, dar încă nu este bine precizat dacă acesta este de natură termică sau nu.

Praful cosmic joacă un rol important în manifestarea radiațiilor infraroșii în galaxiile spirale cu evidență pentru prezența silicaților.

Printre galaxiile cu radiație bogată în infraroșu, galaxiile Seyfert și cele asemănătoare cu ele reprezintă o grupă cu cele mai numeroase obiecte de acest fel. În conformitate cu datele existente, fluxul de radiație în infraroșu este proporțional cu fluxul radio pe care-l emit nucleele active ale acestor galaxii.

Galaxiile superluminoase au o luminozitate $L \approx 10^{13} L_{\odot}$, care este considerabil mai mare decît aceea a galaxiilor Seyfert. Reamintim că Galaxia noastră are luminozitatea $L \approx 10^{9} L_{\odot}$, pe cînd aceea a regiunilor de H II este de numai $10^{5}-10^{6} L_{\odot}$. Trei dintre cele mai luminoase supergalaxii prezintă linii de emisie ale fierului. Dintre acestea, Markarian 231 este foarte luminoasă și în domeniul optic ($M_v = -23$) ; foarte probabil că aici este vorba de un obiect care face legătura dintre galaxii și quasari.

Prezentăm aici cîteva dintre obiectele extragalactice care au fost cercetate în domeniul infraroșu.

● *Norul Mare al lui Magellan* este cea mai apropiată galaxie și aparține galaxiilor neregulate. În infraroșu el a fost observat cu telescopul de 3,9 m, de la o bază de cercetări anglo-americană. Cu această ocazie a fost cercetată regiunea de hidrogen ionizat nr. 159 în care s-a detectat un emițător compact cu temperatura de numai 850 K. A fost descoperită prima protostea extragalactică situată la numai 150 de mii de ani lumină, dar care este de 1 000 de ori mai mare decît Soarele și de cîteva mii de ori mai strălucitoare decît astrul

zilei. Acest obiect nu poate fi observat optic, din cauza absorbției pe care o suferă lumina atunci cînd traversează gazul și praful din jurul lui. Se apreciază că vîrsta acestei protostele ar fi mai mică de 100 000 ani.

Pentru prima dată, protostelele au fost descoperite în Galaxia noastră, aici fiind cunoscute cîteva zeci de astfel de obiecte. Dar detectarea unei protostele extragalactice vine în favoarea ipotezei că procesul de formare a stelelor este aproximativ același în tot Universul.

● *Galaxia din Andromeda* (M 31) a fost cercetată la lungimile de undă $1,1\ \mu m \leq \lambda \leq 10\ \mu m$ și s-a constatat că aici predomină stelele gigante. Este o galaxie săracă în praf, iar bulbul central se aseamănă cu o bară. Are un nucleu liniștit.

● *Galaxia enigmatică M 82* are strălucire slabă în ultraviolet și albastru. De aceea, pentru cercetarea regiunilor din interiorul adînc al acesteia, s-au preparat emulsii pentru plăci fotografice sensibile în infraroșu. Observații efectuate cu emulsiile respective, precum și cele obținute cu aparatele de la bordul unui balon, arată că în partea centrală a lui M 82 se găsesc numeroase stele albastre foarte fierbinți, de tipurile O și B, grupate în asociații.

Luminozitatea acestor stele este absorbită de praful existent care o reemite sub formă de radiație roșie. De aici rezultă concluzia că, nu demult, aici a avut loc o masivă formare de stele. Acest rezultat explică multe din caracteristicile observate și este împotriva ipotezei unei explozii în nucleul respectiv.

În diapazonul $5\ \mu m \leq \lambda \leq 30\ \mu m$, galaxia M 2 prezintă detalii bogate legate de emisie și absorbție. Se evidențiază formațiuni structurale cu dimensiunile de 2–4 secunde de arc. În infraroșul îndepărtat, luminozitatea acestei galaxii este evaluată la $4.10^{10} L_{\odot}$ și este determinată de procesul de formare a stelelor în partea centrală.

● *Galaxia NGC 253* a fost observată dintr-un experiment spațial" ; s-a determinat $L = 2.10^{10} L_{\odot}$ și s-a evidențiat absorbția luminii provocată de silicați, la lungimea de undă $\lambda = 10\ \mu m$.

Galaxiile asemănătoare cu M 82 și NGC 253 au multe caracteristici comune cu galaxiile Seyfert 2, printre acestea fiind evidențiate : luminozitate mare, nuclee compacte și luminoase, linii intense de emisie, scurgere de gaz din interior

spre exterior, în părţile centrale fiind posibilă activitatea procesului de formare a stelelor.

● *NGC 1068* este reprezentanta galaxiilor Seyfert 2, în care liniile interzise şi liniile Balmer au aceleaşi lărgimi. Cu o depărtare de 20 Mpc, s-a evaluat $L = 5 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ la $\lambda = 10$ µm. Distribuţia energiei în spectrul acestei galaxii este asemănătoare cu aceea a galaxiei M 82 şi a regiunilor de H II din Galaxia noastră. Foarte probabil că radiaţia în infraroşu a acestei galaxii este de natură termică—radiaţie emisă de gazul şi praful interstelar în urma procesului de încălzire provocat de radiaţiile stelare. De altfel, prezenţa prafului în această galaxie este susţinută şi de radiaţia care vine de la partea centrală şi care ar putea să fie de natură sincrotron.

Observarea galaxiilor în infraroşu este foarte importantă pentru a stabili dacă procesul sincrotron putea fi declanşat de interacţiunea mareică dintre două sau mai multe galaxii.

ii) *Obiectele de tipul BL Lacerta* au şi ele caracteristici importante remarcate de observaţiile în infraroşu. Aici, spre deosebire de galaxiile Seyfert, problema legată de variaţia strălucirii devine deosebit de importantă. Foarte probabil că aici avem de-a face cu radiaţie infraroşie de natură sincrotron, variabilitatea observată fiind cel mai puternic argument împotriva naturii termice a radiaţiei.

Cu telescopul de 3,8 m de pe Mauna Kea au fost detectate fluctuaţii cu perioada de cel puţin 30 minute la obiectul OJ 287 care aparţine grupului de surse de tipul BL Lacertae. În plus, la data de 24 noiembrie 1979 s-a observat o variaţie cu timpul de creştere şi cel de descreştere de ordinul secundelor. La aceste obiecte s-au observat variaţii cu amplitudinile de ordinul cîtorva magnitudini stelare.

Fotometria cu timp mare de rezoluţie a lui OJ 287, la lungimea de undă $\lambda = 1{,}25$ µm a evidenţiat variaţii de o magnitudine stelară la scala de timp de ordinul minutelor. Aceste variaţii au fost însoţite de o modificare substanţială a culorii.

Pe de altă parte, variaţiile scurt periodice sugerează dimensiuni foarte mici pentru sursa respectivă, mult mai mici decît cele cunoscute mai înainte.

Dintre obiectele de tipul BL Lacertae, cel mai cercetat în infraroşu este AO 0235+164. Au fost semnalate variaţii

la diferite lungimi de undă, luminozitatea corespunzătoare fiind cuprinsă între $3 \cdot 10^{13}$ şi $3 \cdot 10^{14}$ luminozităţi solare.

La unele obiecte de tipul BL Lacertae mai luminoase s-au observat variaţii substanţiale şi în polarizare. Dar, după cum se ştie, gradul de polarizare creşte o dată cu descreşterea lungimilor de undă. Aici însă variaţiile în polarizare nu sînt întotdeauna însoţite de variaţii mari în fluxul de radiaţie, un rezultat greu de explicat prin modelele convenţionale ale acestor obiecte.

iii) *Quasarii* reprezintă o categorie importantă de surse infraroşii. Aşa cum arată datele observaţionale, cea mai mare parte a quasarilor au spectrele mult deplasate spre roşu, aici putînd fi întîlnite linii care, într-un cadru obişnuit de laborator, aparţin domeniului optic. Iată de ce observaţiile în infraroşu permit să se cerceteze unele caracteristici ale quasarilor, caracteristici ce nu sînt accesibile altor domenii spectrale. Amintim cîteva dintre cele mai semnificative rezultate.

Quasarul 3C 273 are spectrul variabil. O erupţie a acestuia a fost observată la începutul anului 1972 pe lungimea de undă $\lambda = 10$ µm, rezultatul confirmînd concluziile furnizate de observaţiile de la $\lambda = 2{,}2$ µm. Variabilitatea observată a lui 3C 273 nu este compatibilă cu un mecanism termic pentru emisia de energie observată. Se presupune natura nontermică a radiaţiei. La lungimea de undă $\lambda = 10$ µm acest quasar are luminozitatea $L = 10^{13} L_{\odot}$, de aceea el este unul dintre obiectele extragalactice uşor de observat la această lungime de undă.

La lungimea de undă de 3 µm spectrul lui 3C 273 sugerează faptul că în această sursă se găseşte praf cosmic încălzit şi care emite o fracţiune din radiaţia infraroşie. Prin urmare, quasarul 3C 273 este un exemplu de sursă extragalactică în care acţionează atît mecanismul emisiei termice, cît şi cel al emisiei nontermice.

În spectrul lui 3C 273 s-a observat linia *alfa* a seriei Paschen cu o intensitate apropiată de cea prevăzută prin teoria spectrelor de recombinare. Aceeaşi constatare se evidenţiază şi în legătură cu linia H_{β}. Se constată că aici înroşirea este destul de mică, iar panta discontinuităţii Balmer pare a fi o proprietate a acestei serii de emisie.

La *quasarul 3C 345*, de asemenea, se pune în evidență o variabilitate a radiației în infraroșu, variabilitate care apare în sincronism cu cea detectată în domeniul optic.

La *quasarul 3C 279* variabilitatea este atît de rapidă încît este foarte greu de urmărit.

Toți acești quasari, precum și alții care nu au fost amintiți, au variabilități foarte rapide, fapt pentru care, la explicarea mecanismului radiației infraroșii, va trebui să luăm în considerare radiația sincrotron și ciocnirile Compton.

Față de rezultatele prezentate mai sus există și unele date observaționale contradictorii. Astfel, la lungimea de undă $\lambda = 2\,\mu m$ se pare că există două categorii de quasari: cu variabilitate puternică (3C 279) și quasari cu variabilitate moderată. În unele lucrări, 3C 275 este considerat ca aparținînd la quasarii cu variabilitate mică. Rezultate contradictorii sînt anunțate și în legătură cu prezența prafului în interiorul quasarilor.

În privința variabilităților, quasarii se aseamănă cu obiectele de tipul **BL** Lacertae (lacertidele), dar corelarea observațiilor din infraroșu cu cele optice scot în evidență o serie de deosebiri.

În fine, o ultimă clasă de obiecte extragalactice importante pentru domeniul infraroșu o constituie galaxiile Seyfert 1. Le considerăm pe acestea ca o grupă de obiecte asemănătoare cu quasarii, de aceea le amintim în partea finală a acestui capitol. Reprezentatul clasei de galaxii Seyfert 1 este considerată galaxia NGC 5548, dar una dintre cele mai cercetate galaxii de acest fel este NGC 4151, a cărei distribuție a energiei este foarte asemănătoare cu aceea a quasarului 3C 273 (vezi fig. 3.3). La fel ca în cazul quasarilor, nici la glaxiile Seyfert 1 nu se poate preciza mecanismul care stă la baza generării de energie. Unii cercetători sînt de părere că ar putea coexista două sau chiar mai multe surse care determină emisia de energie în domeniile spectrale de la ultraviolet la infraroșu.

În cazul galaxiilor Seyfert 1, polarizarea luminii este prea slabă pentru a putea susține unul din mecanismele presupuse pentru generarea energiei și emisia respectivă.

Ca un argument în favoarea mecanismului nontermic al radiației s-a încercat să se utilizeze datele observaționale

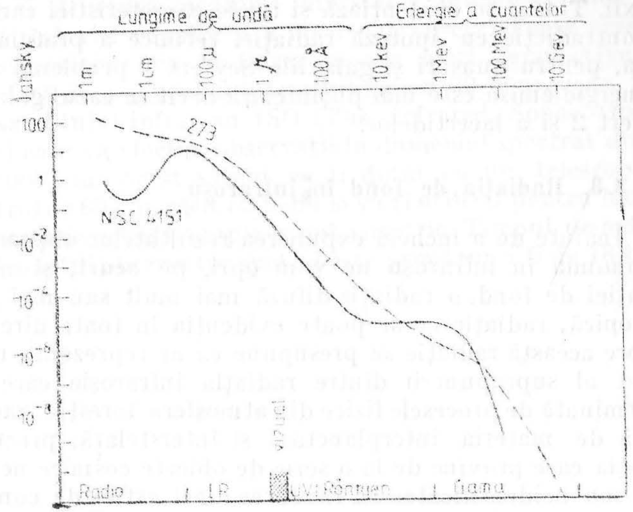


Fig. 3.3. Distribuția energiei la quasarul 3C 273 și galaxia Seyfert NGC 4151. În abscisă se găsesc lungimile de undă, iar în ordonată se află intensitatea energiei exprimată în Jansky.

furnizate de variabilitatea galaxiilor Seyfert 1, dar nu s-au obținut concluzii lipsite de incertitudini. Cu toate acestea, se pare că variabilitățile respective sînt mai mari decît erorile de observație, fapt pentru care se presupune că modelul radiației termice ar fi potrivit pentru aceste obiecte. Un astfel de model este susținut și de caracteristicile spectrale observate în infraroșu. Prezența prafului în galaxiile Seyfert este susținută de observațiile efectuate și în domeniul spectral $1\,\mu m < \lambda < 3\,\mu m$.

Dovezi suplimentare în favoarea ipotezei emisiei termice în galaxia Seyfert NGC 4151 au fost obținute prin observații la lungimea de undă $\lambda = 3{,}3\,\mu m$. Este vorba de o interpretare asemănătoare cu aceea dată pentru sursele infraroșii din Galaxia noastră.

Spre deosebire de quasari, la galaxiile Seyfert 1 există indicații directe cu privire la faptul că radiația termică a prafului existent ar fi esențială în nucleele acestei clase de

galaxii. Totuși se evidențiază și unele caracteristici care sînt în contradicție cu ipoteză radiației termice a prafului. De aceea, pentru quasari și galaxiile Seyfert 1 problema sursei de energie emisă este mai puțin clară decît în cazul galaxiilor Seyfert 2 și a lacertidelor.

3.8. Radiația de fond în infraroșu

Înainte de a încheia expunerea rezultatelor obținute de astronomia în infraroșu ne vom opri, pe scurt, și asupra radiației de fond, o radiație difuză mai mult sau mai puțin izotropică, radiație ce se poate evidenția în toate direcțiile. Despre această radiație se presupune că ar reprezenta un rezultat al suprapunerii dintre radiația infraroșie care este determinată de procesele fizice din atmosfera terestră, radiația emisă de materia interplanetară și interstelară, precum și radiația care provine de la o serie de obiecte cosmice nerezolvate sau neidentificate. În favoarea unei astfel de concluzii vin și rezultatele care arată că emisia infraroșie a atmosferei terestre este caracterizată prin liniile oxigenului neutru (O I), rezultat obținut prin observațiile efectuate cu aparatele de la bordul unor rachete. Apoi, radiația mediului interstelar evidențiază prezența ionilor de carbon (C II, $\lambda = 156$ μm), siliciu (Si II, $\lambda = 35$ μm) și neon (Ne II, $\lambda = 13$ μm).

Înainte de a ajunge la observatorul terestru, radiația care vine de la anumite surse cosmice (în principal de la stele) este supusă unui proces de înroșire atunci cînd ea traversează mediul interstelar. Aici radiațiile optice și ultraviolete sînt puternic absorbite de praful interstelar care se încălzește și emite în infraroșu. Apoi, în jurul stelelor tinere sau bătrîne există învelișuri de praf circumstelar care are o contribuție importantă la procesul de înroșire. În plus, norii de hidrogen ionizat și cei moleculari contribuie la fenomenul de înroșire. Toate aceste surse, care contribuie la înroșirea generală a stelelor, au un rol determinant și la radiația infraroșie de fond.

Așadar, în urma celor prezentate mai sus, ajungem la concluzia că astronomia în infraroșu furnizează informații cu privire la procesul de formare a stelelor, desfășurarea proceselor fizice în interiorul învelișurilor circumstelare, compoziția și structura mediului interstelar, procesele fizice din centrul Galaxiei noastre și a altor galaxii etc. Toate acestea arată că astronomia în infraroșu are mari perspective de viitor. Iată de ce , pentru începutul anilor '90 se prevede lansarea satelitului infraroșu ISO (The Infrared Space Observatory) care va efectua observații în domeniul spectral dintre 3 și 2 000 μm. Acest satelit va fi dotat cu un telescop cu diametrul de 60 cm, răcit cu heliu și va fi utilizat pentru lucrări de fotometrie, spectroscopie și polarimetrie. Timpul de activitate al acestui observator spațial este prevăzut a fi de 18 luni.

Capitolul 4

ASTRONOMIA ÎN ULTRAVIOLET

În anul 1801, fizicianul german Johann Wilhelm Ritter (1776–1810), prin observarea modului de desfășurare a anumitor reacții chimice, în zona de dincolo de partea violetă a luminii vizibile, a descoperit regiunea ultravioletă a luminii solare. Astăzi se știe că domeniul ultraviolet al spectrului electromagnetic este definit prin lungimile de undă $100 \text{ Å} \leq \lambda \leq 4\,000 \text{ Å}$. Fotonii cu astfel de lungimi de undă suferă o absorbție puternică la trecerea lor prin atmosfera terestră. În plus, fotonii cu $\lambda < 912$ Å suferă o absorbție suplimentară atunci cînd, prin mediul interstelar, întîlnesc atomi de hidrogen neutru pe care îi ionizează.

Prin utilizarea unor emulsii fotografice speciale sau fotomultiplicatori cu sensibilitate specifică lungimilor de undă scurte, astronomii au reușit să înregistreze radiații ultraviolete din vecinătatea domeniului optic, dar este în discuție o fracțiune extrem de mică a domeniului ultraviolet general. Apoi, prin extrapolarea rezultatelor obținute în domeniul vizual, cercetătorii au prevăzut teoretic existența unui număr mare de obiecte care, fiind foarte fierbinți, au emisia maximă de energie la lungimile de undă mai mici decît acele ale domeniului vizual. Iată doar cîteva din motivele pentru care, odată cu lansarea rachetelor și sateliților artificiali ai Pămîntului, problema efectuării unor observații, cu aparatele lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre, au vizat și acest domeniu spectral.

Printre cele mai remarcabile realizări tehnice în sprijinul astronomiei în ultraviolet amintim:

— Observatorul astronomic orbital lansat la 21 august 1972, care a fost cunoscut sub notația OAO–C=OAO–3, căruia i-a fost atribuit numele marelui astronom polonez N. Copernicus, de la nașterea căruia se împlineau atunci 500

de ani. La bordul acestui satelit s-a amplasat un spectrometru cu putere mare de rezoluție în ultraviolet. Rezultatele obținute se referă, mai ales, la mișcarea mediului interstelar și vînturile stelare legate de anumite stele fierbinți[1].

— Satelitul IUE (International Ultraviolet Explorer) a fost lansat în noiembrie 1978, ca un rod al colaborării unor observatoare europene și americane. La bordul acestui satelit a fost amplasat un telescop cu diametrul de 45 cm. S-au efectuat observații asupra unor stele, galaxii și chiar asupra unor planete.

— Satelitul sovietic „Astron", lansat la 23 martie 1983, a fost dotat cu un telescop cu diametrul de 80 cm și cu receptoare sensibile la $\lambda < 1\,400$ Å.

La aceste realizări se mai adaugă și mulțimea de rezultate obținute de diferite nave spațiale sau echipaje de cosmonauți care, pe lîngă alte cercetări, au avut misiunea de a observa cerul în ultraviolet.

Pentru dezvoltarea astronomiei în ultraviolet au fost depuse eforturi în vederea cercetării unui număr mare de probleme legate de cunoașterea Universului. Printre acestea amintim: structurile fizice ale cromosferelor și coroanelor stelare, intensitățile vînturilor stelare și masele de substanță purtată de ele, determinarea temperaturilor înalte ale norilor de materie interstelară, observarea instabilităților în învelișuri stelare etc. Asupra unora dintre aceste probleme ne vom opri în cele ce urmează.

4.1. Aspectul bolții cerești în ultraviolet

Deoarece culorile stelelor sînt determinate de temperaturile corespunzătoare, este de așteptat ca stelele să se prezin-

[1] Receptoarele de la bordul observatorului „Copernicus" aveau sensibilitatea pentru radiațiile cu lungimea de undă cuprinse în intervalele: 711–1 492Å, 775–1 650Å, 1 550–3 300Å și 1 632–3 185Å. Dar așa cum se vede din figura 1.2. diferitele domenii spectrale au și părți commune cu cele învecinate. De aceea, un satelit destinat observării într-un anumit domeniu spectral, ar putea furniza și eventualele date înregistrate în domeniile spectrale adiacente. Poate că și acesta este un motiv pentru care unii autori îl consideră pe „Copernicus" ca un observator și pentru radiații X.

te cu străluciri diferite în domenii spectrale diferite: stelele albastre sînt mai strălucitoare în ultraviolet, decît stelele roșiatice. Stelele din clasele spectrale O și B sînt cele mai luminoase stele și au temperaturile cuprinse între 10 000 și 50 000 K, luminozitățile corespunzătoare fiind de peste un milion de ori mai mari decît luminozitatea solară. Aceste stele sînt relativ tinere (vîrsta lor este mai mică decît cîteva milioane de ani), sînt asociate cu norii denși de praf din care s-au format, se găsesc în vecinătatea planului galactic și, de obicei, sînt grupate în roiuri deschise și asociații stelare.

Stelele cu temperaturi superficiale mai mari de 10 000 K emit o cantitate apreciabilă din energia lor la lungimile de undă mai mici de 3 000 Å, limita inferioară a lungimilor de undă ale radiațiilor care mai pot trece prin atmosfera terestră. O stea mai fierbinte de 20 000 K emite aproape întreg fluxul de energie într-un domeniu spectral care nu se poate înregistra cu aparatele de la sol.

În septemprie 1969, cu aparatele de la bordul unei rachete a fost fotografiată bolta cerească în regiunile constelațiilor Orion, Monoceros și Canis Major. În urma analizei fotografiilor astfel obținute s-a constatat că „harta cerului" în ultraviolet (UV) este complet diferită de aceea pe care o cunoștem din domeniul vizual. Steaua Betelgeuse (α Orionis), steaua cea mai strălucitoare în domeniul optic — o supergigantă de tipul M2 — este mult prea „rece" pentru a mai fi înregistrată în ultraviolet. În schimb, steaua Rigel (β Orionis), o supergigantă de tipul B8, are imaginea proeminentă pe fotografiile luate în ultraviolet. La fel se prezintă și alte stele din această constelație: γ Orionis, K Orionis etc. De altfel, constelația Orion este bogată în stele luminoase de tipurile O și B, această constelație fiind importantă pentru toți aceia care se interesează de legătura ce există între stelele timpurii și mediul interstelar. În fig. 3.1. am reprezentat aspectul constelației Orion în infraroșu și ultraviolet.

4.2. Observarea sistemului solar în ultraviolet

După cum se știe, spectrofotometria reprezintă un instrument puternic pentru cercetarea atomilor și moleculelor care produc absorbția sau emisia în partea ultravioletă a spectrului electromagnetic. De aceea, se poate spune că analiza spectrală furnizează informații asupra părților constituente ale atmosferei, precum și asupra modului în care se realizează starea de echilibru în păturile înalte ale atmosferei planetare.

În cazul planetei *Venus*, datele observaționale ale analizei spectrale scot în evidență prezența unor linii atomice interzise: linia hidrogenului neutru ($\lambda = 1\,216$ Å) ca urmare a difuzei liniei solare Ly_α în atmosfera venusiană, liniile oxigenului neutru ($\lambda = 1\,304$ Å și $\lambda = 1\,356$ Å) care pun în evidență prezența oxigenului în atmosfera acestei planete etc.

Atmosfera *Pămîntului* este și ea sursă de radiații în ultraviolet. În regiunea de trecere dintre atmosferă și spațiul interplanetar (exosfera și geocoroana) hidrogenul și heliul reprezintă componentele principale. S-au observat linia Ly_α ($\lambda = 1\,216$ Å) a hidrogenului și linia heliului neutru ($\lambda = 584$ Å).

În cazul atmosferei planetei *Marte* s-a evaluat raportul dintre moleculele de oxigen O_2 și cele ale dioxidului de carbon, raport care se apropie de valoarea 1 : 100.

Pentru celelalte planete am amintit rezultatele importante obținute în infraroșu.

Observații interesante s-au efectuat și asupra *cometelor*, unde s-au pus în evidență regiuni intense (halo-uri) de la care se recepționează linia Ly_α. Aici hidrogenul neutru este considerat a fi un produs rezultat prin disocierea apei care a sublimat în regiunea capului cometei considerate.

În cazul unor comete amănunțit cercetate s-a determinat conținutul de hidrogen care a fost evaluat la circa 10^{12} g.

În ultraviolet *Soarele* se prezintă mai puțin strălucitor decît în vizual. Totuși, observarea Soarelui în acest domeniu este deosebit de importantă, deoarece rezultatele astfel obținute vin să clarifice mai multe probleme de fizică solară. Cu aparatele de înregistrare lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre, sensibile la radiații ultraviolete, s-au pus în evidență unele variabilități ale luminozității și s-a stabilit o corelație între acestea și modul de manifestare a activității solare înregistrate în alte domenii spectrale.

Prin intermediul tehnicii domeniului ultraviolet s-au obținut informații despre spectrul solar pînă la $\lambda = 33{,}7$ Å, unde s-a înregistrat linia Ly_α a carbonului de cinci ori ionizat

(C VI). Au mai fost detectate linii de rezonanță sau de ionizare, ale celor mai abundente elemente chimice (C IV, N III, N V, OI — O VI, Ne VIII, Mg X, Si XII etc.). Aceste linii de absorbție își au energia la diferite nivele ale cromosferei solare sau în stratul de tranziție dintre cromosferă și coroană.

Considerăm util să reamintim faptul că spectrul optic al Soarelui se caracterizează printr-un număr mare de linii de absorbție — liniile Fraunhofer. Dar la lungimile de undă 1 500 Å $<\lambda<$ 2 000 Å liniile de emisie devin proeminente. La lungimile de undă $\lambda<$ 1 500 Å spectrul continuu este lipsit de linii de absorbție, linia de emisie Ly_α a hidrogenului devine cea mai intensă. Apoi, la lungimile de undă cu ceva mai mari decît 912 Å devin observabile mai multe linii ale seriei Lyman, printre acestea din urmă aflîndu-se și Ly_β.

La 11 septembrie 1973 s-au obținut imagini monocromatice ale Soarelui în trei linii de emisie care proveneau de la plasma solară (gaz ionizat) la temperaturi foarte diferite.

— Pe lungimea de undă λ = 977 Å, linia carbonului dublu ionizat, s-a stabilit existența unei plasme cu temperatura de 60 000 K.

— La lungimea de undă λ = 1 032 Å, linia oxigenului de cinci ori ionizat, a fost evidențiată regiunea de trecere dintre cromosferă și coroană, la o temperatură de 300 000 K.

— La lungimea de undă λ = 625 Å, linia magneziului de nouă ori ionizat, s-a evidențiat o regiune situată la peste 70 000 km deasupra discului solar, unde s-a determinat temperatura de peste 1 000 000 grade Kelvin.

În zilele de 19 și 20 august 1979 s-au pus în evidență schimbări în structura găurilor coronale, pe măsură ce rotația solară le aducea spre centrul discului aparent.

4.3. Observarea stelelor în ultraviolet

Încă prin anul 1956, Paul W. Merrill a subliniat importanța astrofizică a dubletului de linii spectrale (λ = 2 796 Å și 2 803 Å) ale magneziului ionizat. Pe atunci Soarele era singura stea la care fuseseră observate aceste linii, dar în anul 1972 se cunoșteau deja cel puțin patru obiecte cu astfel

de caracteristici: Soarele (GO), γ Cassiopeia (BO, 5), Sirius (A1) și Vega (AO). Analiza unor astfel de rezultate punea în evidență faptul că lărgimea echivalentă a liniilor din dubletul amintit era corelată cu clasa spectrală a stelei considerate. De aici s-a ajuns, apoi, la concluzia că o astfel de caracteristică ar putea deveni un parametru util și pentru clasificarea spectrală, rezultat care a rămas valabil și după analiza observațiilor efectuate cu aparatele de la bordul satelitului OAO-2. În acest ultim caz era vorba de rezultatele obținute pentru cel puțin opt stele.

Stelele de clase spectrale tîrzii devin observabile în ultraviolet atunci cînd sînt înconjurate de o atmosferă activă, aici creșterea temperaturii fiind determinată de prezența unor procese asemănătoare cu acela din cromosfera solară (o dată cu creșterea distanței de la fotosferă se constată o creștere a temperaturii cinetice).

În partea violetă a spectrului solar, la limita dintre domeniile optic și ultraviolet, sînt proeminente liniile H și K ale calciului ionizat (λ = 3 968 Å și 3 933 Å). De aceea, detectarea dubletului de linii ale calciului ionizat în emisie într-un spectru stelar ne îndreptățește să presupunem că steaua respectivă este înconjurată de o cromosferă. Dar, deoarece magneziul este mai abundent decît calciul, liniile lui trebuie să se prezinte mai intense, iar cromosfera se poate detecta cu mai multă ușurință.

Cu aparatele de la bordul satelitului IUE s-au înregistrat linii de emisie în spectrul stelei „reci" α Aurigae (Capella) și s-au adus date interesante cu privire la cromosferele stelare. Printre liniile de emisie astfel identificate se găsesc și acele ale carbonului de trei ori ionizat (C IV) la lungimile de undă λ = 1 548 Å și 1 550 Å, precum și aceea a nitrogenului de patru ori ionizat (N V) la λ = 1 240 Å.

În ultimul timp, printr-o tehnică adecvată, s-a înregistrat un număr mare de stele strălucitoare în ultraviolet. În plus, observațiile efectuate în acest domeniu spectral au pus în evidență prezența unor învelișuri circumstelare — materie „suflată" din stelele respective. Această constatare este de mare importanță pentru problemele de evoluție stelară. Astfel, de exemplu, steaua S Doradus, din Norul Mare al lui Magellan, care emite de vreo 1,4 ori mai multă energie decît Soarele și

care are masa de aproximativ 50 de mase solare, se găsește în faza pierderii de masă prin intermediul unui înveliș circumstelar. Observațiile, efectuate cu aparatele de la bordul lui IUE și cele obținute cu telescopul de 1,5 m de la Observatorul european austral din Chile, au stabilit că această stea pierde circa o masă solară în cursul a 1 500 ani. O astfel de pierdere de masă poate să existe într-o fază scurtă din evoluția unei stele. Foarte probabil că S Doradus parcurge următorul tablou de evoluție stelară : ea a ajuns la secvența principală ca o stea de clasă spectrală O și cu o masă de circa 60 mase solare. Apoi, pe măsură ce ea înaintează spre actuala stare de evoluție, pierderea de masă se produce într-un ritm relativ lent, ca și la alte stele de tipul O sau B. Dar, după ce temperatura și masa s-au redus, rata pierderii de masă a ajuns la actuala valoare.

Avînd în vedere faptul că S. Doradus are o importantă pierdere de masă într-un timp relativ scurt — cîteva zeci de mii de ani — atmosfera ei de hidrogen se va epuiza, se va forma o atmosferă de heliu, iar steaua va ajunge la tipul de stea cunoscută sub denumirea de stea Wolf-Rayet (caracterizată printr-o atmosferă în expansiune și cu linii de emisie în spectru).

În figura 4.1 am reprezentat schematic o stea cu înveliș circumstelar prin care trece vîntul stelar continuu de la interior spre exterior.

Partea din înveliș situată între stea și observator produce linii de absorbție, deoarece temperatura învelișului este mai mică decît temperatura stratului de la care vine radiația. Aici, deplasarea învelișului spre exterior, prin efectul Doppler, determină deplasarea spre violet a liniilor spectrale.

Pe de altă parte, învelișul stelar, care nu se găsește pe linia de vizare, și nici în imediata vecinătate a acesteia, este alcătuit din gaz fierbinte, temperatura lui fiind determinată de încălzirea provocată de stea. De aceea, ca orice gaz fierbinte, învelișul gazos va determina apariția liniilor de emisie. Prin urmare, în spectrul stelei vor exista atît linii de emisie, cît și linii de absorbție. Astfel de spectre sînt cunoscute sub denumirea de *profile de tipul P Cygni*. Aici, în partea frontală (spre observator), absorbția „înghite" emisia, pe cînd părțile laterale sînt caracterizate numai prin emisie.

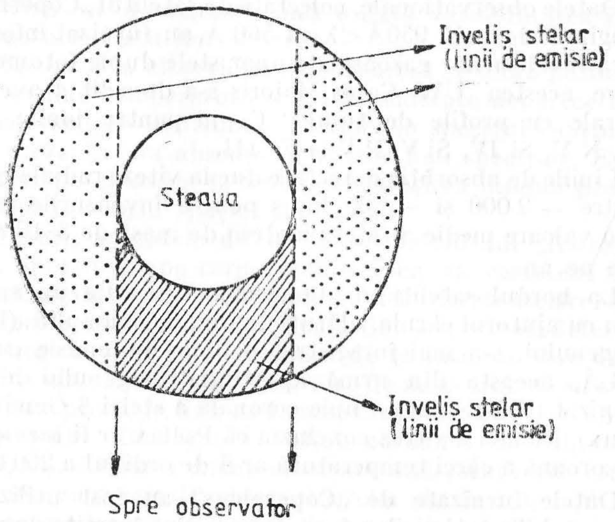


Fig. 4.1. Reprezentarea schematică a unei stele cu înveliș.

La stelele cu atmosfere subțiri emisia învelișului este prea slabă pentru a fi înregistrată, de aceea aici avem de-a face numai cu linii de absorbție.

La stelele Wolf-Rayet, care sînt caracterizate prin linii puternice de emisie, emisia învelișului este atît de puternică încît absorbția este neînsemnată. Iată de ce, stelele Wolf-Rayet, deși au linii intense de emisie, nu au profile de tipul P Cygni.

Spectre cu profile de tipul P Cygni se observă, în ultravioletul îndepărtat la stele fierbinți (de clase spectrale O) și la stelele foarte luminoase (gigante și supergigante) de clase spectrale B.

Observarea stelelelor în ultraviolet aduce date importante cu privire la pierderea de masă prin vîntul stelar. Cu viteze de peste 3 000 km/s aceste vînturi transportă importante cantități de material stelar pe care-l împrăștie în spațiul dintre stele. În plus, materialul respectiv poate întîlni nori de materie interstelară cărora să le imprime viteze destul de mari.

Datele observaționale, colectate de satelitul „Copernicus", la lungimile de undă 950Å<λ<1 560 Å, au furnizat informații asupra învelișurilor gazoase ale unor stele duble fotometrice; printre acestea UW Canis Majoris s-a dovedit a avea linii spectrale cu profile de tipul P Cygni pentru ionii: C III, C IV, N V, Si IV, Si V, P V și Fe III.

Liniile de absorbție detectate duc la viteze radiale cuprinse între — 2 000 și — 800 km/s pentru învelișurile gazoase și la o valoare medie a ratei pierderii de masă de $3\cdot10^{-6}$ mase solare pe an.

La bordul satelitului „Copernicus" se afla un spectrometru cu ajutorul căruia, alături de linia Lyman-alfa (Ly_{α}) a hidrogenului, s-a mai înregistrat o linie de emisie cu λ = 1 218 Å, aceasta din urmă aparținînd oxigenului de patru ori ionizat (O V) și este o linie coronală a stelei β Geminorum (Pollux). De aici s-a tras concluzia că Pollux ar fi înconjurată de o coroană a cărei temperatură ar fi de ordinul a 260 000 K.

Datele furnizate de „Copernicus" au fost utilizate și pentru stabilirea tipurilor de stele care sînt însoțite de vînturi stelare puternice și pentru investigarea proceselor fizice care stau la baza acestora. Astfel, din analiza datelor observaționale privind vînturile stelare ale stelelor de tipurile spectrale O și B, s-a constatat că puterea vînturilor este strîns legată de luminozitate și mai puțin de temperatură, fapt care vine să susțină punctul de vedere conform căruia presiunea de radiații în ultraviolet este aceea care acționează asupra gazului din straturile superficiale ale acestor stele fierbinți.

O caracteristică importantă a vînturilor stelare este și variabilitatea intensității lor în cursul timpului. Au fost detectate variații cu perioadele de circa trei ani la toate cele 15 stele cercetate.

În unele cazuri au fost evidențiate și perioade de ordinul lunilor sau chiar orelor (γ Cassiopeiae).

De altfel, datele observaționale au arătat că și la lungimile de undă ale domeniului optic au fost înregistrate fluctuații în intensitatea liniilor de emisie. S-a arătat că astfel de fluctuații constituie o trăsătură caracteristică a stelelor supergigante de clasele spectrale B și Of. În plus, la stelele Of s-a înregistrat o variabilitate intrinsecă și la gradul de polarizare liniară, fapt

care vine să dovedească încă o dată variabilitatea în timp a structurii vînturilor stelare.

Spectrul în ultravioletul îndepărtat ne oferă posibilitatea de a evalua temperatura stelei considerate deoarece aceasta depinde atît de distribuția energiei în spectrul continuu, cît și de prezența sau absența anumitor linii spectrale. Evident, aici trebuie să avem în vedere și înroșirea luminii provocată de absorbția prin spațiul interstelar.

Printre aparatele de la bordul satelitului „Astron" s-au găsit spectroscoape care aveau sarcina să cerceteze materia stelară, să caute elemente grele în atmosferele stelare. În mod deosebit trebuiau puse în evidență liniile spectrale determinate de scurgerea puternică a masei de la interior spre exterior. Se știa deja că scurgerile puternice de masă trebuie să se manifeste prin prezența liniilor de rezonanță ale celor mai abundente elemente: hidrogenul, heliul, carbonul, azotul, oxigenul și neonul. Liniile acestor elemente sînt situate la lungimile de undă inaccesibile observatoarelor de la sol, fapt pentru care se credea că scurgerea de masă lipsește la majoritatea stelelor. Iată de ce, observațiile în ultraviolet erau chemate să pună în evidență gradul de scurgere a masei la stele de diferite clase spectrale.

În decembrie 1973, astronauții de pe nava *Soyuz 13* au obținut spectrele ultraviolete ale mai multor stele, folosind pentru aceasta un telescop Cassegrain(∅=24) cm și detectoare sensibile pentru lungimile de undă 2 000 Å<λ<5 000 Å.

Misiunea *Gemini 12* a efectuat fotografii stelare la lungimile de undă 2 000 Å<λ<4 000 Å.

Observațiile fotometrice și spectroscopice în ultraviolet aduc informații prețioase și în privința problemelor fizice ale unor sisteme de stele duble strînse. La astfel de obiecte se urmăresc date observaționale legate de straturile exterioare ale celor două componente, astfel de date putînd confirma existența anumitor stadii de evoluție stelară.

Misiunea *Apollo 17* și *Skylab* au observat steaua dublă α Virginis.

În vederea cercetării corpurilor cerești cu instrumente, lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre în anul 1966, NASA lansează, fără rezultate deosebite, observatorul astronomic orbital (OAO-1). Apoi, în decembrie

1968, aceeași agenție spațială lansează satelitul OAO-2 care avea vreo 16 instalații pentru verificarea pozițiilor stelare și telescoape pentru radiații în ultraviolet.

Pe la mijlocul lunii aprilie 1971, observatorul astronomic orbital OAO-2 a observat steaua dublă CW Cephei ($P =$ 2,729 zile).

Cele două stele componente ale sistemului CW Cephei sînt stele tinere de tipurile spectrale O și B ; ele au fost observate de OAO-2 la lungimile de undă $\lambda = 1\,920$ Å, 2 460 Å, și 3 330 Å. Pe această cale s-a stabilit o corelație între forma minimului secundar în curba de lumină și lungimea de undă la care sînt efectuate observațiile. De aici se trag concluzii importante cu privire la structura învelișului gazos care ar putea să existe în jurul uneia sau a ambelor componente.

Observatorul OAO-2 a furnizat date fotometrice cu privire la curba de lumină a stelei duble β Lyrae.

Tot la această categorie de stele trebuie menționată și descoperirea unui companion fierbinte la steaua HD 3 080 = *a* Puppis. Această stea era cunoscută mai înainte ca un sistem de două stele, dar cu un singur spectru observabil, perioada orbitală fiind de 2 660 zile. Observațiile efectuate de misiunea Skylab cu un spectrograf cu prismă, la lungimea de undă $\lambda = 1\,700$ Å (ultravioletul îndepărtat), au pus în evidență unele caracteristici pe baza cărora acest sistem binar a fost inclus în *grupa stelelor simbiotice*.

Cercetarea stelelor simbiotice a figurat și în planul de cercetare al observatorului „Astron". Este vorba de stelele duble ale căror componente sînt stele gigante, componentele principale fiind stele gigante roșii. Din componenta principală are loc o scurgere de masă care, în parte, este captată de componenta secundară. În acest proces de acreție, energia gravitațională, transformată în energie termică, încălzește substanța din straturile exterioare ale componentei secundare. De aceea, în spectrele unor astfel de stele se detectează linii spectrale ale unei stele atît la temperatură joasă ($\approx 3\,000$ K), cît și la temperaturi ridicate.

Procesele amintite mai sus, cu privire la stelele simbiotice, sînt nestaționare, uneori producîndu-se adevărate erupții care determină o creștere a strălucirii cu vreo 4 magnitudini în domeniul optic. În ultraviolet predomină radiația fierbinte, fapt pentru care erupțiile se manifestă mai spectaculos.

Tot în cadrul sistemelor de stele duble strînse pot fi incluse stelele de sipul U Geminorum și novele pitice care se caracterizează prin creșteri ale strălucirii cu 1 — 4 magnitudini. Astfel de erupții pot să dureze o perioadă de timp de cîteva săptămîni. Între erupții strălucirea sistemelor respective se menține constantă.

Novele pitice sînt stele duble, ambele componente avînd strălucire foarte slabă în domeniul optic. Pe diagrama H-R (vezi figura 1.5) acestea se situează la stînga și puțin mai jos față de secvența principală. Componentele principale ale unor astfel de sisteme sînt cele mai luminoase în domeniul optic și aparțin claselor spectrale mai tîrzii decît F. Se presupune că din componenta principală are loc o scurgere de masă care este captată de componenta secundară, are loc o creștere a masei secundare și se produce o încălzire a substanței din jurul acesteia din urmă. Aceeași acreție de masă determină apariția unor procese nestaționare care, în final, determină fenomenul de novă. Cea mai mare parte a energiei unor astfel de obiecte este emisă în ultraviolet. Iată un motiv în plus pentru utilizarea acestui domeniu spectral la cercetarea stelelor de diferite tipuri.

4.4. Observarea nebuloaselor și a mediului interstelar în ultraviolet

După cum s-a anunțat la timpul respectiv, cosmonauții de pe nava Apollo 16 au depus o cameră fotografică pe Lună pentru a înregistra imaginea ultravioletă a Pămîntului și mai cu seamă pentru cercetarea aurorelor polare. Aceeași misiune, însă, a avut preocupări și cu privire la înregistrarea în ultraviolet a nebuloaselor „America de Nord" (North America) și Bucla din Cygnus (Cygnus Loop).

„Nebuloasa America de Nord" este situată în constelația Cygnus la numai 3° de steaua Deneb (α Cygni). Ea reprezintă un mare nor de gaz puțin iluminat (NGC 7 000), a cărei imagine fotografică se aseamănă cu America de Nord. În octombrie 1976, această nebuloasă a fost fotografiată în ultravioletul îndepărtat la lungimile de undă $1\,230\ \text{Å} < \lambda < 2\,000$ Å. Cu această ocazie s-a constatat că ea este surprinză-

tor de luminoasă în acest domeniu spectral. Radiația totală a acestei nebuloase este de vreo trei ori mai mare decît radiația observată direct a stelei HD 199, 579 (m_v=6,0) de tip spectral 06 și care este presupusă a fi sursa de excitație a nebuloasei pentru a fi observabilă în domeniul optic.

Nebuloasa Cygnus Loop se află la 2 000 ani lumină de noi și reprezintă restul unei supernove care a explodat, probabil, cu 47 000 ani în urmă.

Cu ajutorul aparatelor de la bordul satelitului IUE s-au obținut informații cu privire la stările fizice ale nebuloaselor în care se găsesc resturi de supernove. Au fost detectate liniile spectrale care corespund unor temperaturi înalte, acestea permițînd să se studieze plasma în condițiile undei de șoc care se propagă cu viteza de ordinul a 100 km/s.

Pentru nebuloasele planetare, observațiile în ultraviolet arată că straturile nebulare emit ceva mai puțină energie decît în domeniul optic. Această situație este greu de înțeles deoarece gazele nebuloasei au o temperatură de 9–10 mii de grade Kelvin, pe cînd stelele fierbinți care determină starea de excitare au temperatura de peste 30 000 K și au raportul *luminozitate ultravioletă / luminozitate optică* mai mare decît unitatea.

La fel ca și gazul din nebuloasele de emisie, gazul interstelar poate fi și el detectat prin analiza liniilor de absorbție care se suprapun peste spectrele stelare continue. În domeniul optic astfel de linii aparțin sodiului și calciului, dar acestea reprezintă doar o fracțiune mică din totalitatea liniilor de absorbție care se pot detecta la lungimile de undă mai mici de 3 000 Å și care aparțin elementelor: O, C, N, Si, H și He.

Mediul interstelar observat, care conține vreo 10% din masa Galaxiei, este puternic concentrat spre planul galactic. În acest plan gazul interstelar nu este omogen distribuit, aici existînd regiuni cu densitate mică și regiuni cu gaz dens și fierbinți, precum și nori reci.

În spațiul interstelar cu materie de densitate mică se găsesc circa 0,01 atomi/cm³, la o temperatură de aproximativ 1 000 K. În norii denși, unde radioastronomia a găsit molecule cu structură complexă, se găsesc peste 10 000 atomi/cm³, la o temperatură cuprinsă între 10 K și 20 K. Acești

nori determină linii de absorbție puternică în ultraviolet, liniile carbonului, nitrogenului și siliciului.

Aparatele de la bordul satelitului „Copernicus" au permis să se efectueze o vastă cercetare a hidrogenului atomic și molecular, a oxigenului atomic, a carbonului neutru și ionizat, a nitrogenului, siliciului, oxidului de carbon și multe alte componente ale gazului interstelar. În direcția stelei Procyon (α Canis Majoris; d = 3,5 pc), pentru hidrogenul interstelar s-a obținut densitatea de 0,11 atomi/cm³, o mărime asemănătoare cu aceea determinată în direcția stelei ε Eridani sau a stelei α Centauri. Raportul deuteriu/hidrogen este $1{,}3 \cdot 10^{-6}$ în direcția lui Procyon.

Cu aceleași aparate cu care a fost înzestrat „Copernicus", în mai multe direcții ale spațiului au fost detectați nori cu masă mică, dar care se deplasează cu viteze de pînă la 50 km/s. Unii dintre acești nori sînt foarte fierbinți, avînd temperaturile cuprinse între 10 000 și 100 000 K, iar cele mai proeminente linii de absorbție fiind cele ale siliciului de două ori ionizat (Si III). Au fost detectate regiuni mari, ca aceea din partea de sud a constelațiilor Perseus și Orion, unde există „pături" întinse de material ce se deplasează de-a lungul liniei de vizare, originea lor fiind încă necunoscută. Se presupune că ele ar fi rezultatul unor explozii stelare, sau că ar fi condiționate de vînturi stelare deosebit de puternice.

4.5. Astronomia extragalactică în ultraviolet

Radiațiile ultraviolete cu $\lambda > 912$ Å care provin de la obiecte extragalactice pot pătrunde în interiorul sistemului solar și să fie recepționate cu aparatele lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre. Iată de ce astronomia în ultraviolet devine importantă și pentru obiectele situate dincolo de limitele Galaxiei noastre.

Aparatele de la bordul observatorului „Astron" au arătat că spectrele ultraviolete ale galaxiilor sînt mult diferite între ele, chiar dacă în domeniul vizual ele apar destul de asemănătoare. Cauzele unor astfel de deosebiri încă nu sînt cunoscute, probabil că aici intervin și efecte evolutive.

Galaxiile tinere sînt considerate a fi surse puternice de radiație ultravioletă, dar, după cum se știe, galaxiile foarte

tinere sînt cele mai îndepărtate și au deplasarea spre roșu mare, contribuind astfel la fondul de radiație în infraroșu, și nu la fondul în ultraviolet.

Galaxia din Andromeda (M 31) prezintă un puternic exces de emisie în ultraviolet, fapt care poate duce la concluzia că aici există foarte multe stele fierbinți.

Radiogalaxia Centaurus - A (NGC 5 128), în domeniile albastru și ultraviolet prezintă niște filamente întinse, nerezolvate în stele, dar cu „noduri" foarte luminoase în ultraviolet. Se pare că aspectele filamentelor sînt caracterizate printr-o emisie puternică, care se observă în linia spectrală interzisă a oxigenului o dată ionizat (O II) ($\lambda = 3\,727$ Å). S-au mai observat liniile H_α și H_β acestea indicînd prezența unor regiuni de hidrogen ionizat (H II) care sînt excitate de emisia stelelor fierbinți scufundate aici, precum și liniile interzise (N II) și (O III).

Galaxia uriașă M 87 din inima roiului de galaxii din Virgo are un aspect caracterizat prin curenți de materie aruncată de la centru spre periferie (vezi figura 2.12). La centrul acestei galaxii, linia interzisă a oxigenului ionizat [O II] apare ca linie de emisie foarte largă. Din lărgimea respectivă, pentru viteza de scurgere a materiei s-a evaluat $v = 1\,500$ km/s.

Pentru observarea galaxiilor Seyfert în ultraviolet s-au utilizat aparatele de la bordul lui IUE, cu care s-a urmărit raportul dintre intensitățile liniilor spectrale $F(Ly_\alpha)/F(H_\beta)$, pentru care în modelele teoretice se acceptase valoarea 40. Acest raport este interesant deoarece galaxiile Seyfert au mici deplasări spre roșu, iar obținerea valorii respective era posibilă numai cu aparatele lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre.

Din clasa de galaxii Seyfert 1, NGC 4 151 este obiectul cel mai strălucitor, situație care a determinat includerea acesteia printre obiectele care să fie observate de IUE. Această galaxie fusese observată mai înainte cu instrumentele de la bordul unei rachete, cînd s-a pus în evidență variația atît a intensității spectrului continuu, cît și a intensității liniilor spectrale. Rezultatele obținute de IUE confirmă rezultatele existente de mai înainte. Au fost înregistrate liniile de emisie pentru : C IV, C III și probabil N V, NIV și Si III. În plus,

s-a evaluat raportul $F(Ly_\alpha)/F(H_\beta) = 2{,}7$ și 4,4, valori apropiate de 5,5 cît s-a determinat pentru 3C 273. Apropierea dintre cele două rezultate sugerează concluzia că cele două feluri de obiecte ar putea avea ceva comun în natura lor.

Tot la galaxia NGC 4 151 amintim și detectarea liniilor de absorbție care aparțin la Si II ($\lambda = 1\,260$ Å) și C II ($\lambda = 1\,335$ Å) și care apar într-o regiune lipsită de linii de emisie. Corelarea dintre aceste rezultate și cele cunoscute în domeniul radiațiilor X (vezi capitolul următor) sugerează prezența unui jet asemănător cu acela observat în domeniul optic la galaxia M 87.

Dintre galaxiile Seyfert 2 cel mai frecvent a fost observată NGC 1 068, iar observațiile furnizate de IUE au fost combinate cu cele existente în domeniul optic și cele din infraroșu. În modul acesta s-a ajuns la concluzia că înroșirea observată pentru acest obiect este determinată, în principal, de radiația termică a prafului și gazului interstelar care, însă, au structuri diferite de cele ale gazului și prafului din Galaxia noastră, din vecinătatea Soarelui.

Din cauza marii deplasări spre roșu, în cazul quasarilor ne putem aștepta ca receptoarele să înregistreze energia emisă într-un domeniu spectral cu totul diferit de acela pentru care este sensibilă aparatura respectivă. Astfel, de exemplu, pentru un quasar cu deplasare spre roșu $z = 0{,}2$, în domeniul optic se pot înregistra radiații cu $2\,800$ Å $< \lambda < 6\,700$ Å. Prin urmare, în astfel de situații, cu aparatele de la sol se poate recepționa o cantitate apreciabilă de energie emisă de quasari în ultraviolet.

În cazul unui quasar cu $z = 3{,}0$, în domeniul spectral $3\,300$ Å $< \lambda < 8\,000$ Å se recepționează energia emisă la lungimile de undă 800 Å $< \lambda < 2\,700$ Å din ultravioletul îndepărtat. Cu toate acestea, observarea quasarilor, cu aparatele amplasate la bordul unor observatoare orbitale, furnizează date suplimentare cu privire la energia emisă de aceste obiecte încă destul de enigmatice. Se speră că dispunînd de observații repartizate de-a lungul întregului spectru electromagnetic, se va putea stabili, cu mai mare ușurință, legătura dintre diferite tipuri de galaxii și quasari. Reproducem aici cîteva dintre cele mai semnificative rezultate.

La 15 aprilie 1977, pentru observarea din New Mexico, a quasarului 3 C273, a fost lansată o rachetă cu un telescop (∅ = 40 cm) la care era ataşat un spectrometru sensibil la lungimile de undă 1 200 Å $< \lambda <$ 1 700 Å. În acest mod s-au pus în evidenţă linii de emisie ale hidrogenului dintre care Ly_α era cea mai intensă. Cu toate acestea, la acest obiect linia Ly_α apare mult mai slabă decît linia H_α din domeniul optic, rezultat determinat de faptul că quasarii se găsesc la mari depărtări de noi iar slăbirea liniei Ly_α ar fi determinată de absorbţia pe care o suferă lumina (la această lungime de undă) prin mediul interstelar. În laborator, linia Ly_α are lungimea de undă λ = 1 216 Å, dar în spectrele quasarilor ea apare mult deplasată spre roşu, spre extremitatea lungimilor de undă mari.

Ca un rezultat remarcabil stabilit la quasari, amintim aici faptul că pe cale observaţională s-a stabilit o corelaţie între luminozităţile absolute ale unor astfel de obiecte şi lărgimile echivalente ale liniilor Ly_α şi C IV ; obiectele mai puţin luminoase prezintă linii mai intense. Prin urmare, anumiţi quasari, chiar dacă au strălucire slabă, ei pot să fie foarte luminoşi.

În legătură cu obiectele de tipul *BL Lacertae* reamintim faptul că spectrele lor sînt „lipsite" de linii spectrale. În unele cazuri însă, se pare că s-au detectat linii spectrale, dar foarte slabe şi „mascate" de luminozitatea puternică a fondului continuu.

Înainte de lansarea satelitului IUE, pentru „absenţa" liniilor în spectrele lacertidelor existau două explicaţii contradictorii : fie că astfel de obiecte ar fi lipsite de materia gazoasă, fie că este absent procesul de ionizare. Dar, lansarea lui IUE a adus rezultate noi care arată că dacă există gaz în aceste obiecte, el trebuie să se găsească în condiţii geometrice şi fizice complet diferite de cele existente în interiorul quasarilor.

Sursa radio compactă 0716 + 71 a fost identificată cu un obiect cvasistelar (m_v=13), ale cărei proprietăţi fizice determină apartenenţa lui la grupa lacertidelor. Observatorul „Einstein" (vezi capitolul următor) a stabilit că acest obiect este o sursă compactă de radiaţii X, iar aparatele de la bordul

lui IUE au recepţionat semnale în ultraviolet la lungimile de undă 1 250 Å $< \lambda <$ 1 900 Å şi 2 400 Å $< \lambda <$ 3 000 Å. Rezultatele astfel obţinute arată că spectrul acestei surse, de la regiunea undelor milimetrice pînă la radiaţiile X, poate fi reprezentat printr-o funcţie de forma $F_\nu = \lambda\nu^{-1}$ cu un exces pronunţat în vecinătatea domeniilor optic şi infraroşu. În plus, s-a pus în evidenţă o variabilitate puternică a luminozităţii în toate domeniile la o scală de timp de ordinul unei luni, cu excepţia domeniului radiaţiilor X, unde scala de timp respectivă este de ordinul cîtorva luni.

Capitolul 5

ASTRONOMIA ÎN DOMENIUL X

Energia radiată de corpurile cereşti pe lungimile de undă dintre $\lambda = 10^{-10}$ cm şi 10^{-6} cm (0,01 Å $< \lambda <$ 100 Å) este absorbită de atmosfera terestră şi nu poate fi recepţionată cu aparatele de la sol. De aceea, cunoştinţele noastre despre aspectul cerului în domeniul X sînt obţinute prin intermediul observaţiilor efectuate cu receptoare lansate la mari altitudini, dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre. Iată de ce considerăm instructiv ca, la începutul acestui capitol, să evidenţiem cîteva dintre cele mai importante realizări tehnice, la care ne vom referi de mai multe ori în cursul expunerii.

5.1. Probleme tehnice cu privire la apariţia şi dezvoltarea astronomiei în domeniul X

Lansarea receptoarelor de radiaţii X la mari altitudini era o problemă dificilă şi costisitoare, dar perspectivele întrevăzute, mai ales după succesele radioastronomiei şi ale astronomiei optice din anii '50, justificau eforturile respective. Se ştia deja că explorarea unei regiuni cît mai largi din spectrul electromagnetic va furniza rezultate remarcabile cu privire la structura şi evoluţia lumii înconjurătoare.

Deşi încă prin anul 1948, cu ajutorul unei rachete V-2, se recepţionaseră radiaţii X de la Soare, pînă în anul 1962 acesta este singurul obiect cosmic cunoscut a fi sursă emiţătoare de energie în domeniul spectral corespunzător.

Între timp, pentru recepţionarea radiaţiilor X s-a propus amplasarea receptoarelor respective în nacela unor aerostate (baloane) sau să se utilizeze anumite rachete şi sateliţi artificiali ai Pămîntului.

Este adevărat că aerostatele prezintă o stabilitate destul de mare şi asigură un timp de observaţie de circa 12 ore în

zilele de vară, neajunsurile lor constau în aceea că ele nu se ridicau la altitudini destul de mari, rareori depăşind 40 kilometri. Pe de altă parte, rachetele, deşi se ridicau la înălţimi mari, timpul în care se puteau efectua observaţiile era doar de cîteva minute, dintre care o bună parte erau utilizate pentru probleme de calibrare. În fine, începînd cu anul 1970, astronomia în radiaţii X profită de tehnica spaţială şi amplasează anumite receptoare la bordul sateliţilor artificiali, rezultatele astfel obţinute depăşind toate aşteptările.

Începînd cu 12 iunie 1962 şi pînă în 1970 au fost amplasate receptoare de radiaţii X la bordul unor rachete şi s-au înregistrat astfel de radiaţii de la mai multe surse extrasolare — din afara sistemului solar — care, după distanţele lor, erau galactice şi extragalactice: centrul Galaxiei, stele diferite, mediul intergalactic, alte galaxii şi chiar anumite obiecte exotice.

Detectarea unui mare număr de surse de radiaţii X a impus şi introducerea unui sistem de notaţie al acestora. Astfel, la început se scrie numele constelaţiei în care se găseşte o anumită sursă de radiaţii X (de obicei aceasta fiind numită şi sursă Roentgen), urmează apoi litera X care arată că avem de-a face cu domeniul radiaţiilor din această regiune a spectrului electromagnetic şi, în fine, se scrie cifra care indică numărul de ordine al sursei în constelaţia respectivă. Prin urmare, notaţia Scorpius X-1 arată că este vorba de prima sursă de radiaţii X descoperită în constelaţia Scorpius (la 12 iunie 1962).

În anul 1964 s-au înregistrat 9 surse galactice de radiaţii X, iar în anul 1965 au fost recepţionate radiaţii X de la sursele extragalactice M87 (NGC 4 486) şi radiosursa Cygnus-A.

Cu toate realizările înregistrate, pînă la sfîrşitul anilor '60, astronomia în radiaţii X se afla în stare de devenire.

La 12 decembrie 1970 a fost lansat primul satelit artificial al Pămîntului, satelit special pregătit pentru detectarea şi înregistrarea surselor de radiaţii X. Este vorba de satelitul Explorer 42 lansat de NASA, cunoscut sub denumirea de UHURU, ceea ce în limba swahili înseamnă libertate (pace). Acest satelit a mai fost cunoscut şi sub denumirea de SAS-1 (the first Small Astronomical Satellite), el fiind un observator astronomic cu destinaţie specială. Avea două detec-

toare de radiații X și trebuia să examineze bolta cerească în proporție de 85 %, să înregistreze cît mai multe surse de radiații X și să determine pozițiile corespunzătoare.

Satelitul UHURU avea greutatea de 175,5 kg din care 70 kg erau ocupate de receptoarele pentru radiații X. Orbita satelitului avea apogeul la 560 km, iar perigeul la 520 km, înclinarea planului orbital față de ecuatorul terestru fiind de numai 3°. Aparatele de înregistrare erau sensibile la diapazonul 2—20 keV. Satelitul a activat (cu mici pauze) pînă în vara anului 1973 și a înregistrat 339 surse de radiații X.

După primele 70 de zile de activitate, UHURU înregistrase deja 125 surse de radiații X, fapt care a dus la întocmirea primului catalog de surse X. Au urmat apoi alte trei ediții.

Dintre sursele de radiații X înregistrate de UHURU, cea mai luminoasă era Scorpius X-1 (Sco X-1), pe cînd cea mai slabă era galaxia din Andromeda (M 31).

Pentru notarea surselor din cataloagele UHURU s-a utilizat litera U precedată de o cifră care marchează ediția catalogului respectiv. Apoi litera U este urmată de patru cifre care marchează ascensia dreaptă și, în fine, alte două cifre reprezintă declinația. Astfel, de exemplu, 3 U 0154-47 reprezintă o sursă din cel de al treilea catalog UHURU cu coordonatele ecuatoriale : $\alpha = 1^h\ 54_m$, $\delta = -47°$.

Trebuie remarcat aici faptul că pozițiile surselor de radiații X stabilite de UHURU aveau o eroare de ±2 minute de arc, eroare care a îngreunat identificarea obiectelor optice corespunzătoare surselor respective. O ameliorare în pozițiile determinate de UHURU s-a efectuat prin observații radio, acolo unde a fost posibil, în acest scop fiind utilizate anumite interferometre. În acest mod erorile de poziție au fost reduse pînă la circa două secunde de arc.

Din examinarea rezultatelor obținute de UHURU s-au desprins următoarele concluzii :

— Au fost detectate aproape toate sursele de radiații X mai importante din Galaxie.

— Majoritatea surselor de radiații X care nu se află în planul galactic sînt surse extragalactice.

— Dintre sursele de radiații X galactice, peste 70% au intensitate variabilă. Șapte dintre acestea sînt resturi de

supernove, altele fiind stele componente ale unor sisteme de stele duble strînse (ex. Hercules X-1 = HZ Herculis).

— Au fost descoperite surse temporare de radiații X, un fel de stele care erup într-un mod asemănător cu novele din domeniul optic (de ex. 3U 0154-47).

La 29 septembrie 1971 a fost lansat Observatorul Orbital Solar OSO-7, pe o orbită aproape circulară, la 550 km deasupra suprafeței terestre, cu scopul de a cerceta erupțiile solare. Cu aparatele de la bordul acestui satelit s-au obținut rezultate necunoscute pînă atunci. Este vorba de procesele fizice legate de erupțiile solare și anumite proprietăți ale coroanei respective.

În martie 1972 a fost lansat satelitul ESRO TA-1R (European Space Research Organization) care, printre altele, era dotat cu spectrofotometre sensibile la lungimile de undă $\lambda = 2\,100$ Å, 2 500 Å și 2 800 Å. Acesta a fost primul satelit astronomic european, avea orbita aproape circulară și cîntărea aproximativ 140 kg.

La 15 octombrie 1974 a fost lansat satelitul englez Ariel-5, primul satelit pregătit de specialiștii britanici pentru cercetarea surselor de radiații X. Acesta era dotat cu aparatură științifică în greutate de 135 kg și avea șase telescoape la bord. A funcționat pînă la 14 martie 1980, timp în care, pe lîngă alte înregistrări, a detectat vreo 10 surse temporare (trecătoare) de radiații X.

Obiectele descoperite de Ariel-5 au notația asemănătoare cu aceea din cataloagele lui UHURU. Astfel, de exemplu, A 1118-64 reprezintă sursa înregistrată de Ariel-5 la coordonatele ecuatoriale $\alpha = 11^h\ 18_m$, $\delta = -64°$, o sursă pe care acest satelit a descoperit-o în decembrie 1974 în constelația Centaurus.

Satelitul olandez ANS (= Astronomical Netherland Satellite) a fost lansat în august 1974 și a contribuit la înregistrarea unor erupții ale surselor X, una dintre acestea fiind observată în „nebuloasa" NGC 6624, în constelația Sagittarius.

În luna mai 1975 a fost lansat satelitul american SAS-3 (the third Small Astronomical Satellite) care a cules informații despre erupțiile surselor X.

La 21 iunie 1975 a fost lansat Observatorul orbital solar OSO-8 la altitudinea de 550 km.

La 12 august 1977 a fost lansat satelitul american destinat cercetării energiilor înalte HEAO-1 (the first High-Energy Astronomy Observatory) care, printre altele, a înregistrat Nova Ophiuchi 1977 pe care, la 8 septembrie 1977, o găsește mai luminoasă decît Nebuloasa Crab, ambele fiind observate în radiații X. Acesta a mai observat unele stele fierbinți cum sînt Sirius (α Canis Majoris), Capella (α Aurigae) și a detectat radiații X de la sistemul stelar α Centauri.

Aparatele de la bordul lui HEAO-1 au examinat regiunea din bolta cerească în care se găsește sistemul stelar triplu 40 Eridani. Aici a fost înregistrată o nouă sursă X care a primit notația H 0405—08, dar încă nu se știe la care din cele trei componente aparține noua descoperire.

La 13 noiembrie 1978 a fost lansat satelitul HEAO-2 care, în amintirea celor o sută de ani scurși de la nașterea fizicianului Albert Einstein (1879 — 1955), a primit denumirea de „Observatorul de radiații X Einstein“. Acest satelit avea un telescop cu deschiderea de 58 cm la care erau atașate patru receptoare. Avea o sensibilitate de vreo 1 000 de ori mai mare decît sateliții precedenți, fapt care i-a permis să adune un vast material observațional.

Pînă în martie 1981, cînd și-a întrerupt activitatea, observatorul „Einstein“ a înregistrat mai multe surse de radiații X galactice și extragalactice. Numai în Galaxia din Andromeda (M31) a detectat 69 surse de radiații X discrete și 7 regiuni difuze. A observat 107 quasari dintre care 6 aveau deplasare spre roșu $z>3$.

În anul 1979 este lansat satelitul japonez HAKUCHO ale cărui receptoare erau sensibile la domeniile energetice 1 — 12 keV, 12 — 30 keV și 35 — 65 keV.

La 26 mai 1983, agenția spațială europeană (ESA) lansează satelitul EXOSAT (European X-ray Observatory Satellite). Lansarea s-a efectuat cu o rachetă *Delta* 3914, de pe coasta Oceanului Pacific din California. Scopul acestei realizări a fost cercetarea emisiei în domeniul radiațiilor X în diapazonul energetic dintre 1,5 keV și 50 keV și s-a urmărit scintilația gazului interstelar în domeniul delimitat de 2 keV și 80 keV (1 170Å—3 200 Å). În plus, acest satelit a mai avut

sarcinile de a căuta noi surse de radiații X, determinarea precisă a pozițiilor unor surse deja cunoscute, întocmirea unei hărți cerești cu resturile de supernove și detectarea unor variabilități la scala de timp de ordinul unei milisecunde. A fost dotat cu un telescop de 27 cm în diametru.

Satelitul EXOSAT a fost lansat pe o orbită polară pentru a putea observa ocultațiile de Lună, acestea din urmă constituind un bun prilej pentru determinarea foarte precisă a pozițiilor unor surse de radiații X. Orbita este eliptică, apogeul și perigeul fiind situat la 191 000 km și respectiv 340 km. Aparatele de la bordul acestui satelit trebuiau să funcționeze numai atunci cînd el se găsește în afara centurilor de radiație intensă ale Pămîntului, la o altitudine de peste 50 000 km.

Începînd din 1976 au urmat lansările succesive ale sateliților din seria *Prognoz*, care erau dotați cu aparatură pentru urmărirea activității solare și cercetarea relațiilor Soare-Pămînt. Tot pentru astronomia în radiații X mai amintim lansările sateliților : Saliut 4 și 7, Astron, Cosmos 856, 914 și 1 106.

Cerul observat în radiații X apare asemănător cu acela observat în vizual sau radio. Calea Lactee apare cu concentrația obiectelor sale spre planul și centrul galactic, numărul de surse X descrescînd atunci cînd crește latitudinea galactică. Pe fondul difuz al cerului există o componentă de radiații X care, probabil, provine de la unele surse discrete, dar încă nedetectate. În figura 5.1 este reprodus aspectul cerului în radiații X.

Încercările de a identifica sursele de radiații X cu obiectele corespunzătoare observabile și în domeniul optic erau dificile din cauza erorilor mari cu care, la început, se determinau pozițiile surselor X. Cu toate acestea există deja o serie de rezultate obținute și în această problemă. Astfel, din observațiile efectuate asupra Lunii (1964), cînd ea se găsea între observator și Nebuloasa Crab, cu ajutorul unui telescop de radiații X purtat de o rachetă, s-a constatat că sursa X din constelația Taurus (Taurus X-1) coincidea cu nebuloasa respectivă. În 1966 s-a constatat că Scorpius X-1 coincide cu o stea care, în domeniul optic, are magnitudinea m = 12,5 etc.

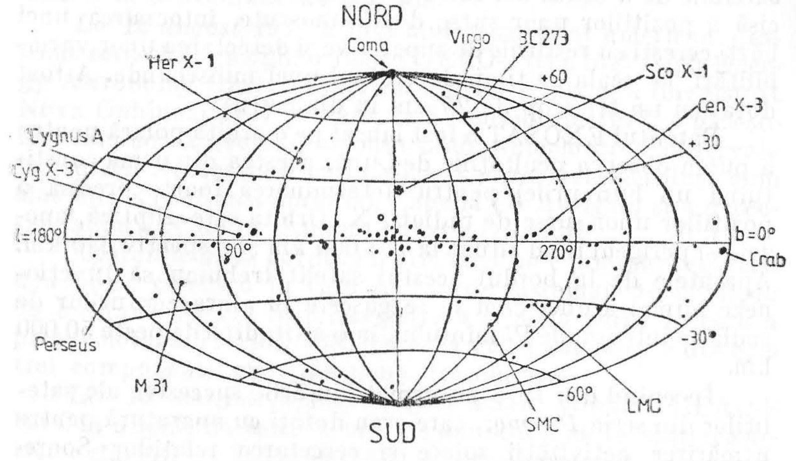


Fig. 5.1. Harta cerului în radiații X întocmită de UHURU. Reprezentarea este executată în coordonate galactice; LMC=Norul Mare al lui Magellan, SMC=Norul Mic al lui Magellan.

5.2. Soarele „văzut" în domeniul X

După cum se știe, Soarele este steaua cea mai apropiată de noi, ceea ce a permis observarea lui la toate lungimile de undă. Iată de ce Soarele a fost primul obiect cosmic de la care s-au înregistrat radiații în domeniul radiațiilor X.

Ca și în alte domenii spectrale, și în domeniul radiațiilor X avem de-a face cu Soarele calm și Soarele agitat. Fluxul de radiații X variază foarte rapid o dată cu schimbările produse în „activitatea solară", dar, cu toate acestea, în comparație cu alte surse X, Soarele rămîne întotdeauna, cel puțin cu trei ordine de mărime, mai strălucitor decît cea mai luminoasă sursă extrasolară — Scorpius X-1.

Din observațiile efectuate cu aparatele de la bordul unor observatoare orbitale s-a constatat că cea mai mare parte a energiei emisă în domeniul X este determinată de așa-numitele condensații coronale care sînt situate undeva la mii de kilometri deasupra unor regiuni active de pe fotosfera solară cum ar fi, de exemplu, petele solare.

În regiunile unde se găsesc condensările din coroana solară, densitatea și temperatura au valori mult mai mari decît în regiunile adiacente. Cauza care determină apariția condensărilor coronale este prezența cîmpului magnetic, fapt care poate să explice și caracterul neomogen al acestor formațiuni, mărimile temperaturii și densității fiind determinate de intensitatea cîmpului magnetic în fiecare punct din coroană. În plus, pe o fotografie obținută în radiații X se constată că, alături de unele regiuni active, pe discul solar apar și o serie de puncte luminoase care sînt legate de modul de manifestare a cîmpului magnetic solar.

Ca și petele solare, condensările coronale pot avea o existență de ordinul de mărime al săptămînilor sau chiar al lunilor.

În timpul eclipselor totale de Soare, coroana solară nu poate fi acoperită în întregime de Lună și, prin aceasta, nici condensările coronale. De aceea, în decursul unor astfel de eclipse fluxul de radiații în domeniul X nu se reduce la zero, iar în atmosfera terestră se mai pot detecta anumite variații în condensările de electroni.

Fără îndoială, Soarele este destul de bine cercetat în domeniul radiațiilor X, emisii corespunzătoare fiind înregistrate de la diferite regiuni structurale. În lucrarea *Universul în radiație X* de E. Țifrea, A. Dumitrescu și G. Mariș (1987) sînt prezentate în mod detaliat rezultatele cunoscute. Astfel, numai pentru coroana calmă se au în vedere următoarele regiuni: 1) găuri coronale, 2) structuri sub formă de bucle mari, asociate cu regiuni magnetice unipolare, 3) regiuni de interconexiune a centrelor active, 4) cavități filamentare și 5) puncte strălucitoare. Dintre acestea, fiecare regiune este caracterizată printr-o anumită emisie de radiații X, dar mecanismul care determină existența emisiei respective este o problemă încă nelămurită.

Rezultate importante s-au obținut și prin observarea erupțiilor solare în radiații X.

Din analiza spectrului în radiații X s-au descoperit serii de linii ale elementelor chimice ale căror atomi au pierdut o mare parte din învelișul de electroni. Cu alte cuvinte, spectrul solar în radiații X este determinat de o recombinare continuă a ionilor puternic ionizați. Printre ionii de acest fel se

găsesc: O VI — O VIII, Fe XXV, Fe Mg X — Mg XII, SiIV și Si XIII. Liniile de rezonanță ale tuturor ionilor puternic ionizați se află în domeniul spectral care corespunde la $\lambda \leq 25 \cdot 10^{-8}$ cm. În plus, aici se mai pune în evidență și prezența unei importante emisii continue.

În ultimul timp s-a dovedit că radiațiile X care vin de la condensările din coroana solară reprezintă radiația termică a plasmei fierbinți, temperatura în coroană fiind cuprinsă între $3 \cdot 10^6$ și 10^7 K, pe cînd fotosfera are doar $6 \cdot 10^3$ K.

În problemele de fizică solară, prin cercetarea emisiei X se obțin informații cu privire la compoziția chimică a plasmei din coroana solară, despre structura condensărilor coronale și despre procesele fizice care caracterizează acest fel de emisie. Emisia solară X are un rol deosebit de important în cercetarea relațiilor Soare-Pămînt; aceste radiații ionizează straturile superioare ale atmosferei terestre — ionosfera. După cum se știe, ionosfera protejează biosfera terestră împotriva efectelor mortale ale fotonilor X, dar aceasta are importanță și în realizarea comunicațiilor radio.

5.3. Observarea stelelor normale și a stelelor variabile în domeniul X

În primul paragraf al acestui capitol am prezentat modul în care au fost efectuați primii pași pentru cercetarea cerului în domeniul X și am amintit primele descoperiri, printre acestea fiind incluse și anumite stele.

Așa cum am subliniat și în paragraful precedent, Soarele este o sursă importantă de radiații X, deși este vorba de o stea normală din punctul pe vedere al clasificării generale a stelelor. De aceea, este de așteptat ca și stelele de acest fel să fie emițători X.

Avînd în vedere faptul că stelele se găsesc la depărtări mult mai mari decît se află Soarele față de noi, emisia de energie în domeniul X se va înregistra cu mai mare dificultate. Totuși, multe dintre sursele galactice au fost identificate cu anumite stele normale.

Aparatele de la bordul satelitului „Einstein" au înregistrat radiații X de la Sirius, Capella, α Centauri etc. Cercetarea a peste 60 de stele de clase spectrale de la 0 la M a dus la

stabilirea faptului că, la stele de tipuri spectrale timpurii, emisia X reprezintă circa 10^{-7} din radiația totală. Acest rezultat este valabil pentru stelele gigante, supergigante și cele de pe secvența principală. Roiul tînăr din Pleiade arată în domeniul X aproape tot așa ca și în domeniul optic.

Radiația X emisă de stelele din clasele spectrale G și M nu este legată de luminozitatea totală, dar depinde puternic de viteza de rotație a regiunilor ecuatoriale. Cu cît steaua se rotește mai repede, cu atît este mai „fierbinte" în acest domeniu spectral. Descoperirea acestei corelații ne permite să tragem anumite concluzii în legătură cu mecanismul de încălzire a coroanelor stelare. Pe de altă parte, rotația stelei prin efectul de dinam, contribue la generarea cîmpului magnetic și, prin aceasta, se poate explica starea fizică din coroana unei stele.

Amintim aici cîteva dintre cele mai semnificative rezultate privind observarea stelelor magnetice în domeniul X.

Capella (α Aurigae) este o stea dublă spectroscopică cu componentele de tipurile spectrale G5 III și GO III, cu perioada orbitală de 104 zile și este situată la distanța de 14 parseci. Componenta principală (G5 III) are o masă de trei mase solare iar raza $R = 14 R_{\odot}$. În domeniul X această stea a fost observată în cursul anului 1975, cînd, între cromosferă și coroană, s-a detectat o regiune de tranzit, asemănătoare cu aceea din cazul Soarelui. S-a determinat temperatura coronală de $1{,}2 \cdot 10^6$ K; foarte probabil că emisia de radiații în domeniul X este asociată cu componenta secundară (GO III).

Cu ajutorul unei rachete care, la 15 aprilie 1974, s-a ridicat la o mare altitudine, de la Capella s-au înregistrat radiații X cu energiile cuprinse între 200 și 1 600 eV.

În spectrul stelei Cappella, aparatele de la bordul observatorului „Einstein" au identificat liniile care aparțin elementelor chimice: Mg XI, Si III și S XV, rezultatele fiind în bună concordanță cu cele furnizate de alte observații.

Cu aparatele de la bordul lui ANS, de la Sirius s-au obținut indicații privind radiațiile X moi, de la lungimile de undă cuprinse între 44 și 62 Å. Observațiile arată că în acest domeniu spectral Sirius emite $9 \cdot 10^{27}$ erg/s. Aceste

date ar putea fi explicate prin invocarea emisiei de la coroana fierbinte din jurul lui Sirius; totuşi ipoteza unui vînt stelar este respinsă.

Dintre rezultatele astronomiei în radiaţii X, obţinute în cercetarea stelelor variabile amintim, pe scurt, cîteva dintre cele mai semnificative:

— Cu aparatele de la bordul satelitului EXOSAT au fost înregistrate erupţii, în domeniul X, de la binara fotometrică Algol(β Persei), care s-au dovedit a fi sincronizate cu eclipsarea reciprocă a celor două componente, rezultate deosebite fiind înregistrate la minimul secundar, eclipsarea componentei mai puţin strălucitoare.

— Steaua AM Herculis este, de asemenea, o stea dublă, una dintre stelele componente fiind o pitică albă, cu perioada orbitală $P=3{,}1$ ore. Această stea a fost observată în domeniul radiaţiilor X moi şi tari, şi s-a apreciat că intensitatea cîmpului magnetic este de $2\cdot10^{8}$ Gs. Se presupune că emisia de radiaţii X tari este determinată de acreţia de gaz în vecinătatea polilor magnetici prin procesul bremsstrahlung. O parte din această radiaţie este absorbită de suprafaţa stelei însoţitoare care, prin încălzire, va emite radiaţii X moi şi o parte de radiaţii în ultraviolet. Este vorba de o sursă X care furnizează rezultate importante şi pentru domeniul ultraviolet[1].

Emisie de radiaţii X s-a mai obţinut şi de la alte stele care fac parte din grupa stelelor variabile de tipul AM Herculis. Printre acestea se numără şi stelele variabile AN Ursae Majoris şi VV Puppis, în acest sens trebuind să menţionăm rezultatele furnizate, în noiembrie 1975, de către SAS-3. Curba de lumină a lui AN Ursae Majoris este foarte asemănătoare cu aceea a lui AM Herculis, dar problemele polarizării par a fi diferite, această ultimă chestiune fiind deosebit de importantă atunci cînd se elaborează modele teoretice pentru astfel de stele.

— Din clasa lui AM Herculis face parte şi sursa 2A 0311−227, care a fost observată şi de satelitul HEAO-1.

[1] AM Herculis a fost identificată ca fiind corespondentul optic al sursei 3CU 1 809+50.

— Steaua SU Ursae Majoris face parte din grupa stelelor variabile cataclismice sau novele pitice. Strălucirea acestei stele creşte cu circa 0,6 magnitudini la o scală de tip de ordinul minutelor. Poziţia unei astfel de stele încă nu este destul de bine precizată pe diagrama H−R. Cu ajutorul aparatelor de la bordul observatorului „Einstein" au fost recepţionate radiaţii X de la această stea prin intermediul cărora pe lungimea de undă $\lambda=18$Å, a fost pusă în evidenţă prezenţa unui inel în jurul acestei surse. Diametrul inelului este evaluat la 14 minute de arc care, la distanţa de 100 parseci, corespunde lungimii liniare de 2,6 ani lumină (0,8 pc). Se consideră că procesul de emisie a radiaţiilor este determinată aici de încălzirea materialului existent prin lovirea lui de către unda de şoc provocată de fenomenul de novă, petrecut cu 500 de ani în urmă. Foarte probabil că astfel de observaţii vor reuşi să stabilească o legătură între stelele nove şi novele pitice.

5.4. Stele Roentgen

Reamintim aici că razele X au fost descoperite în anul 1895 de către fizicianul german W.C. Roentgen, de aceea, deseori, aceste raze se mai numesc şi raze sau radiaţii Roentgen. De aici s-a extins şi denumirea de surse Roentgen pentru obiectele care emit astfel de radiaţii. Prin urmare, vorbind despre sursele Roentgen avem în vedere natura obiectelor respective şi nu cercetătorul care le-a descoperit, cum ar fi, de exemplu, galaxiile Seyfert. Am insistat asupra acestei precizări deoarece, deseori, în literatura astronomică întîlnim astfel de denumiri. La fel cum o sursă radio este un obiect care emite puternic în domeniul undelor radio, tot aşa o sursă Roentgen trebuie înţeleasă în sensul că aceasta are un debit important de radiaţii Roentgen, adică o sursă puternică de radiaţii X.

În paragraful precedent am vorbit despre stelele obişnuite ca surse de radiaţii Roentgen însă stelele ale căror radiaţii Roentgen se comportă mult mai ciudat decît radiaţiile optice le vom numi stele Roentgen. Prezentăm aici cîteva surse de acest fel.

Scorpius X-1. Înainte de anul 1962, cercetătorii de la „American Science and Engineering" au realizat un detector de radiații X pe care, cu ajutorul unei rachete, l-au lansat spre Lună pînă la altitudinea de 230 km pentru detectarea radiațiilor X fluorescente care ar rezulta din lumina solară. Acest detector a recepționat însă un semnal Roentgen care nu venea nici de pe Lună și nici de la Soare. El venea din direcția constelației Scorpius. Se descoperise prima sursă X de natură extrasolară, pentru aceasta fiind utilizată notația *Scorpius X-1.*

În anul 1966 s-a constatat că Scorpius X-1 coincide cu steaua variabilă cunoscută în domeniul optic sub notația V_{818} Scorpii și era obiectul cel mai strălucitor în domeniul X de pe bolta cerească; el era de vreo 10 ori mai luminos decît Soarele.

Scorpius X–1 are spectrul X caracterizat printr-un flux de 100 keV·cm^{-2} · s^{-1}, această stea fiind observabilă în domeniile spectrale: Roentgen, ultraviolet, optic, infraroșu și radio. În domeniul optic s-au efectuat observații cu telescopul de 100 țoli, iar în domeniul X a fost urmărit cu aparatele de la bordul lui SAS-3. Între observațiile astfel efectuate s-a stabilit o excelentă corelație.

În domeniul spectral definit prin $1 Å < \lambda < 10$ Å, Scorpius X-1 este cea mai luminoasă sursă de pe bolta cerească. Au fost semnalate variații în strălucire, la scala de timp de ordinul orelor și al zilelor, dar periodicități nu au fost stabilite. Optic, Scorpius X-1 variază între magnitudinile aparente $m=12$ și 13 și este presupusă a fi componenta unui sistem stelar dublu. Se găsește la 500 parseci de la Soare.

Această sursă (Sco X-1) a fost urmărită în infraroșu la $\lambda=1{,}6$ μm și 2,2μm și s-a confirmat justețea modelului unui disc de gaz subțire cu temperatura $T \approx 5 \cdot 10^7$ K.

Spectrele optic și infraroșu arată că radiațiile corespunzătoare ale sursei Sco X-1 dau informații asupra dimensiunilor obiectului respectiv. Se apreciază că radiația infraroșie provine de la un obiect cu diametrul de aceeași mărime ca și cel al unei pitice albe, pe cînd radiația Roentgen provine de la o regiune cu diametrul mult mai mic.

Există încercări de a stabili unele periodicități pentru datele observaționale și s-au apreciat următoarele valori: $P_1=0, {}^d47244$, $P_2=0, {}^d79260$, $P_3=3, {}^d80769$ și $P_4=7, {}^d51562$, litera *d* arătînd că mărimile respective sînt exprimate în zile.

Perioda $P_2=0, {}^d79$ a fost determinată din observațiile fotometrice și, în mod independent, din cele spectroscopice. Aceasta a fost interpretată ca fiind timpul în care steaua respectivă s-ar mișca în jurul unei stele însoțitoare. Alte cercetări susțin ideea că $P_3=3, {}^d8$ ar fi valoarea perioadei orbitale.

Spectrul optic este asemănător cu acela al novelor, această constatare fiind utilizată pentru a face legătura între sursele Roentgen și stelele nove. Prin urmare, se presupune că Scorpius X-1 este o stea dublă strînsă, una dintre componentele respective fiind o stea neutronică — emițătorul de radiații X, pe cînd însoțitorul acesteia este o stea subgigantică care și-a umplut lobul Roche corespunzător. Din această ultimă componentă are loc o scurgere de masă spre steaua neutronică în jurul căreia se formează un disc de acreție. De aceea, se poate considera că variațiile cu amplitudini mici sînt determinate de încălzirea stelei optice de către radiațiile X. Deoarece nu se evidențiază fenomenul eclipselor, se consideră că unghiul de înclinare al planului orbital este mai mic de 30°.

În prezent se cunosc mai multe stele de tipul lui Scorpius X-1. Ele alcătuiesc o clasă caracterizată printr-un spectru continuu foarte albastru, cu linii de emisie.

Cygnus X-1 a fost descoperită în anul 1962, imediat după descoperirea lui Sco X–1 și a fost, pentru astronomi, mult timp o țintă la ordinea zilei.

Dintre sursele Roentgen galactice, Cygnus X-1 s-a dovedit a fi deosebit de importantă pentru astronomi, mai ales că era bănuită a fi o rămășiță a supernovei din anul 1408 î.e.n. și care a fost vizibilă cu ochiul liber vreo 102 zile.

Cygnus X-1 este și o sursă radio importantă fapt care a permis să i se determine poziția precisă și, prin aceasta, să fie identificată cu steaua variabilă V_{1357} Cygni, care este o stea dublă spectroscopică de tipul spectral BO și perioadă orbitală $P=5{,}6$ zile. Este vorba aici de o stea

supergigantă cu magnitudinea aparentă $m=9$ care se află la distanța de circa 2,5 kiloparseci.

Radiația Roentgen a stelei Cygnus X-1 este presupusă a fi determinată de scurgerea de masă de la componenta supergigantă și acreția corespunzătoare pe un obiect colapsat care, foarte probabil, este o gaură neagră. Această sursă este cel mai ferm candidat pentru prezența unei găuri negre într-un sistem binar strîns. Totuși natura radiației Roentgen nu este pe deplin elucidată, la baza discuțiilor stînd datele observaționale legate de variabilitatea emisiei de energie în domeniul X.

Cygnus X-1 a fost observată mult timp, iar variabilitatea radiației respective a fost pusă în evidență prin anii 1966—1968, în acest scop fiind utilizate receptoare amplasate la bordul unor baloane sau rachete. Au fost puse în evidență unele pulsuri la scala de timp de 50 milisecunde, deși o perioadă precisă nu s-a putut stabili.

Foarte probabil că scala de timp la care se produc variațiile în strălucirea Roentgen depinde și de domeniul energetic (spectral) în care sînt efectuate observațiile respective. Astfel, de exemplu, la energii mai mici de 10 keV scala de timp a variațiilor observate este cuprinsă între milisecunde și cîteva zeci de secunde. La energii mai mari de 20 keV, din observațiile efectuate de la bordul unui balon s-au pus în evidență fluctuații rapide, dar există evidențe privind prezența și a unor fluctuații la scală mai mare de timp.

Observațiile furnizate de satelitul Vela 5B, repartizate pe un interval pe timp de circa 10 ani, au indicat prezența unei perioade de 300 zile, rezultat confirmat, oarecum, și de datele furnizate de observatorul Ariel—5.

Între 3 și 5 mai 1975, sursa Cygnus X-1 a fost observată cu aparatele de la bordul lui Ariel-5, în vederea cercetării conținutului de hidrogen neutru. Cu această ocazie s-a detectat o erupție de scurtă durată.

În anul 1977, Cygnus X-1 a fost observată cu aparatele de la bordul lui SAS-3 și s-a constatat o „activitate redusă" a acesteia în domeniul X.

Cygnus X-1 a fost observată și în infraroșu ; se pare că există o corelație între radiația infraroșie și aceea din domeniul X.

În domeniul ultraviolet, Cygnus X-1 pare a fi înconjurată de un înveliș gazos.

Cygnus X-2 a fost descoperită în anul 1967, dar nu are prea multe date observaționale, fapt pentru care există o serie de concluzii contradictorii cu privire la natura acestei surse. La început s-a crezut că s-a descoperit și obiectul optic corespunzător. Mult timp s-a crezut că aici corespondentul optic ar fi steaua variabilă V_{1341} Cygni ($m_{max} = 14{,}41$ și $m_{min} = 15{,}78$), dar ameliorarea preciziei în determinarea pozițiilor acestor obiecte a arătat că identificarea respectivă este îndoielnică.

Analiza datelor observaționale colectate de OSO-8 și Observatorul „Einstein" au evidențiat prezența unor „minime"în curba fluxului de radiații în domeniul X, dar care au loc înainte de a se produce conjuncția inferioară a stelei însoțitoare în raport cu sursa Roentgen, bineînțeles în ipoteza binarității acestei surse. De altfel, ipoteza binarității a fost sugerată în urma observării deplasării liniilor spectrale dar aici era vorba de liniile spectrale ale unei singure stele, cea de-a doua stea componentă fiind probabil mult mai slabă. Totuși observațiile ulterioare au arătat că variațiile observate în pozițiile liniilor spectrale nu ar fi strict periodice, fapt pentru care ipoteza binarității mai poate fi discutată.

Cygnus X-3 este cea de a treia sursă de radiații X, în ordinea descoperirii, în constelația Cygnus (Lebăda). Existența acesteia a fost stabilită în anul 1967, în urma analizei datelor observaționale colectate de aparatele de la bordul unei rachete lansată în anul 1966. După intensitatea radiațiilor X, Cygnus X-3 se încadrează printre cele mai puternice surse Roentgen din Galaxie. După descoperire, această sursă a fost observată și în domeniile radio, infraroșu și gama, fapt pentru care ea se pretează la o serie de cercetări teoretice cu privire la natura mai multor fenomene astrofizice.

În domeniul optic nu s-a detectat obiectul corespunzător, probabil din cauza extincției puternice care, în domeniul optic, este apreciată la 18,9 magnitudini. Este vorba de o absorbție a luminii de-a lungul drumului parcurs de aceasta, depărtarea lui Cygnus X-3 fiind, probabil, mai mare de

15 kpc. Se apreciază că în domeniul optic acestei surse ar trebui să-i corespundă un obiect cu magnitudinea aparentă $m=24$.

Sursa Roentgen Cygnus X-3 are emisie puternică și în domeniul radio, fapt stabilit încă din anul 1971, iar în septembrie 1972 s-a înregistrat o erupție a acesteia. Observațiile ulterior efectuate au arătat că erupțiile mari din domeniul radio se produc în grupe, de vreo două ori pe an. Erupțiile respective se caracterizează printr-o creștere mult mai abruptă decît descreșterea, lumina respectivă prezentînd un înalt grad de polarizare. Această ultimă caracteristică susține ipoteza cu privire la natura sincrotronă a radiației din domeniul radio.

Din măsurarea coeficientului de absorbție a mediului interstelar pe lungimea de undă $\lambda=21$ cm, depărtarea acestei surse este apreciată la numai 8 kpc, aproximativ jumătate din valoarea cunoscută mai înainte.

În domeniul infraroșu, Cygnus X-3 a fost observată pentru prima dată în anul 1972, cînd s-a constatat că și în acest domeniu spectral durata perioadei de pulsație este tot de 4,8 ore, la fel ca în domeniul radiațiilor X. Sursa infraroșie corespunzătoare se caracterizează prin erupții ocazionale care durează doar cîteva minute, deseori apariția respectivă manifestîndu-se sub formă de grupe.

Încercarea de a stabili o corelație între modul de manifestare în infraroșu și cel al radiațiilor X nu a dat rezultate pozitive. Emisia în infraroșu este considerată de natură termică, iar observațiile de mai tîrziu sugerează prezența unei emisii de natură bremsstrahlung termic.

În curbele de lumină observate în domeniile Roentgen, infraroșu și gama se evidențiază prezența unor oscilații neregulate care se corelează cu acelea din domeniul radio. În domeniul gama, în locul unei curbe de lumină cu aspect sinusoidal, se înregistrează pulsuri înguste, care se situează la fazele imediate dinaintea și de după minimul observat în domeniul X.

Observațiile arată că, în domeniul X, curba medie rămîne constantă, dar curbele individuale se modifică de la un ciclu la altul. Stabilitatea perioadei de 4,8 ore sugerează existența mișcării orbitale în jurul unei stele însoțitoare,

deși eclipsările reciproce ale stelelor componente nu sînt observabile pentru observatorul terestru.

Dintre modelele elaborate pentru a explica natura acestei surse, considerăm că prezența unui sistem binar este potrivită cu multe dintre caracteristicile observate. Unii autori postulează prezența a trei corpuri, perioada din orbita lung-periodică avînd durata de circa 4 zile.

În cadrul ipotezei prezenței unui al treilea corp, A. Davidsson și J. P. Ostriker consideră că ar fi vorba de un sistem binar de tipul stelei U Geminorum, în care ambele componente sînt stele pitice scufundate într-un vînt stelar puternic care emană de la pitica roșie. Radiațiile X ar fi generate de acreția de masă pe o pitică albă, iar difuzia electronilor în vîntul respectiv modulează fluxul Roentgen cu perioada de 4,8 ore. Vîntul stelar absoarbe radiațiile X și determină radiațiile ultraviolete prin arderea termonucleară a straturilor exterioare ale piticei albe. Radiațiile din domeniul X care traversează învelișul de gaz (din vîntul stelei pitice roșii) îl încălzește și-l determină să emită energie în domeniile infraroșu și radio. Prezentăm schematic acest model în figura 5.2.

În legătură cu ipoteza sistemului triplu, amintim că pînă acum nu dispunem de un tablou evolutiv al unor astfel de situații.

În legătură cu modelele elaborate pentru Cygnus X-3, amintim că aproape toate pornesc de la ipoteza unui sistem

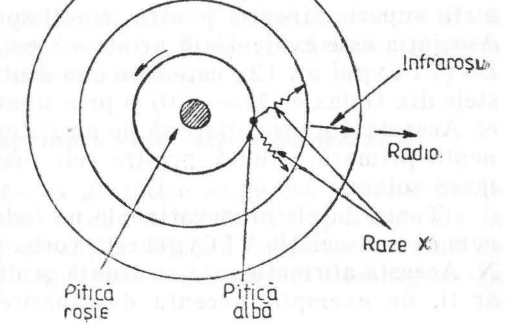


Fig. 5.2. Explicarea modului de formare a radiațiilor X și al emisiunilor în domeniile infraroșu și radio.

binar, dar cu mici modificări față de cel amintit mai sus. Este vorba de unele mici detalii de specialitate asupra cărora nu mai insistăm, mai ales că unii autori pun la îndoială însăși existența perioadei de 4,8 ore. În acest sens amintim că la data de 18 octombrie 1977, sursa Cygnus X-3 a fost urmărită cu aparatele de la bordul unui balon lansat din Palestine, Texas. Cu această ocazie s-a pus în evidență o creștere a fluxului de radiații cu 30% pentru timpul de 1,5 ore. Acest fenomen contrazice însă existența perioadei de 4,8 ore. De aceea, pe lîngă mișcarea orbitală, dacă aceasta este reală, trebuie admisă și existența unei activități eruptive. Ar fi vorba de prezența unor stele variabile în sisteme binare strînse. Pe de altă parte, analiza datelor observaționale din anii 1970—1975 au infirmat existența unor variații în durata perioadei de 4,8 ore.

Cu aparatele de la bordul Observatorului „Einstein", pe o arie cu raza mai mică de 0°,4 din jurul lui Cygnus X-3, s-au descoperit șase surse X, dintre care cinci fac parte din asociația VI Cygni (Cygni OB6). Este vorba de patru stele luminoase de tipul spectral O și o supergigantă B5. În domeniul energetic 0,2—4,0 keV, aceste surse au luminozitatea $L_X = 5 \cdot 10^{33}$ erg/s și temperatura de ordinul a 10^7 K, fapt pentru care se consideră că, prin rezultatele furnizate de Observatorul „Einstein" s-a detectat o nouă sursă Roentgen din Galaxie.

Subliniem aici faptul că asociația stelară OB VI Cygni de mai mult timp a atras atenția astronomilor care lucrează în domeniul optic. Această asociație are mai mulți membri și este caracterizată printr-o înroșire deosebit de mare, pentru a fi superluminoase pentru tipul spectral corespunzător. Asociația este evidențiată printr-o stea supergigantă de tipul B5 (VI Cygni nr. 12), care este una dintre cele mai luminoase stele din Galaxie ($M = -10$) și prin steaua nr. 5 din interiorul ei. Aceasta din urmă pare să fie un sistem binar și are componenta primară situată printre cele mai masive stele (≈ 60 mase solare).

Toate datele observaționale ne îndreptățesc să presupunem că în asociația VI Cygni este vorba de un nou tip de surse X. Această afirmație este susținută și de alte descoperiri cum ar fi, de exemplu, recenta descoperire din vecinătatea lui

Eta Carinae (vezi capitolul 7). Astfel de obiecte furnizează date observaționale pentru cele mai îndrăznețe ipoteze, cum ar fi prezența unor coroane stelare legate de discurile de acreție.

Modele de discuri de acreție cu coroane stelare au fost sugerate pentru binarele Roentgen 4U 2129+470 și 4U 1822—371, unde s-au putut explica bine datele observaționale. Astfel de modele sînt bine puse la punct pentru acele sisteme binare Roentgen la care se observă bine și eclipsarea reciprocă a stelelor componente.

Steaua HD 153919 a fost detectată ca sursă X de către UHURU și este cunoscută sub notația 3U 1700-37. Este vorba de un sistem binar în care componenta principală este o stea de tipul spectral O6f (de magnitudine $m = 6,6$) și un obiect compact — sursa X — care se mișcă pe orbita relativă, cu perioada de 3,4 zile, în interiorul atmosferei extinse a componentei principale. După cum se știe, o stea de tipul Of are o atmosferă extinsă care perturbă vitezele de deplasare ale liniilor spectrale.

Sursa Roentgen 3 U 1700-37 prezintă pulsuri neregulate, care nu se repetă după un interval de timp constant. Motivele pentru care pulsurile se succed după intervale diferite de timp ar putea să fie : i) un paralelism între axa de rotație și axa magnetică în cazul stelei neutronice, ii) linia de vizare ar putea cuprinde axa de rotație și iii) obiectul compact să fie o gaură neagră.

Presupunînd că masa stelei Of ar fi de 27 mase solare, iar raza ar fi $R = 20\,R_{\odot}$, se apreciază că scurgerea de masă, spre obiectul compact, are loc cu viteza de 720 km/s. Această valoare este mai mică decît viteza de expansiune dedusă din profilele observate la stelele de tipul P Cygni, fapt care arată că este vorba de o pierdere de masă asemănătoare cu aceea evaluată pentru alte sisteme binare.

5.5. Resturi de supernove observate în domeniul X

Tot printre sursele X galactice se găsesc și resturile de supernove care au fost intens urmărite cu aparatele de la bordul unor rachete și sateliți artificiali. Cel puțin 7 resturi de supernove au fost înregistrate în domeniul Roentgen. În

plus, au mai fost evidenţiate vreo 16 surse extinse de radiaţii X asociate cu anumite resturi de supernove; este vorba de nişte regiuni cu diametrele de ordinul parsecilor. Reproducem aici cîteva dintre cele mai semnificative caracteristici ale unor obiecte din această categorie [1].

Nebuloasa Crab (NP 0532) este restul supernovei care a explodat în anul 1054 şi a fost observată de astronomii chinezi. La sfîrşitul anului 1968 şi începutul lui 1969 s-au efectuat mai multe observaţii pentru detectarea pulsaţiilor radio şi Roentgen de la această nebuloasă. Astfel, de exemplu, în luna aprilie 1969, spre acest obiect a fost trimisă o rachetă Aerobee, lansată din New Mexico, care a dus receptoarele respective dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre. În modul acesta, în decurs de 190 secunde s-au putut înregistra fotoni X cu energiile cuprinse între 1 500 şi 10 000 eV ($\lambda=8,3$ Å şi 1,2 Å). Din analiza datelor astfel înregistrate s-a constatat că pulsarul Roentgen din Nebuloasa Crab are aceeaşi perioadă ca şi pulsarul radio, $P=0,033099522$ secunde. Această sursă Roentgen are notaţia Taurus X-1.

În ipoteza că Nebuloasa Crab se găseşte la distanţa de 6 000 ani lumină, s-a apreciat că, în cursul fiecărui puls din domeniul X ea emite o energie de circa $3\cdot 10^{34}$ ergi. Foarte probabil că această energie este radiaţie sincrotron determinată de electronii relativişti care se mişcă în cîmpul magnetic corespunzător. Există presupuneri că alături de radiaţia sincrotron ar putea exista şi surse termice de radiaţii X.

Nebuloasa Crab a fost fotografiată şi în domeniul X, rezultatele furnizînd imagini asemănătoare cu cele cunoscute din domeniul optic. Observaţiile ocultaţiilor acestui obiect de către Lună au dus la concluzia că diametrul regiunii care emite radiaţii X descreşte o dată cu creşterea lungimilor de undă la care sînt efectuate observaţiile.

Pulsarul din Vela (PSR 0833–45) a fost descoperit în anul 1968 şi este considerat a avea vîrsta de 10 000 ani, această vîrstă fiind evaluată din durata perioadei de pulsaţie.

[1] Pînă în zilele noastre au fost identificate vreo 120 de resturi de supernove (RSN) care aparţin Galaxiei noastre. Dintre acestea, cele mai multe îşi manifestă prezenţa numai prin emisia radio, emisiile din celelalte domenii spectrale fiind afectate de absorbţia luminii prin mediul interstelar. Numai 24 dintre acestea sînt detectabile în domeniul optic.

Înainte de lansarea satelitului „Einstein", pulsarul din Vela era detectat în toate celelalte domenii spectrale. De aceea, acest pulsar era asociat cu sursa radio care se întinde pe vreo 5° şi era cunoscut sub notaţia Vela X. Imaginile furnizate de Observatorul „Einstein", însă, au arătat că numai o parte mică, de cîteva minute, emite radiaţii X, această regiune fiind foarte intensă spre centrul ei. S-a apreciat că steaua neutronică existentă în regiunea respectivă ar trebui să aibă o temperatură mai mică de două milioane grade Kelvin.

Cu aparatele de la bordul satelitului EXOSAT, pulsarul din Vela a fost observat în domeniul X delimitat de 2 şi 10 keV. Astfel s-a pus în evidenţă faptul că radiaţia respectivă este alcătuită din două componente : una este legată de pulsar şi corespunde regiunii din interiorul cercului cu raza aparentă de 10′–20′ ; a doua componentă, mult mai intensă ($\geqslant 1°$), este asociată cu nebuloasa radio a lui Vela X. Această ultimă componentă conţine radiaţii X mult mai moi decît prima componentă.

Steaua lui Tycho Brahe a devenit supernovă în anul 1572, în domeniul X fiind observată cu aparatele de la bordul satelitului „Einstein". În acest domeniu, restul supernovei lui Brahe nu se prezintă ca un obiect compact care să fie imaginea unui rest central, aşa cum sînt cazurile pulsarilor Crab şi Vela.

Imaginea în domeniul X a supernovei din 1572 este asemănătoare cu harta radio a acestui obiect, fapt care arată că sursa Roentgen ar putea fi reprezentată printr-un strat aproape sferic, care este şi sursă radio. Pentru mecanismul producerii de energie emisă în cele două domenii spectrale se presupune acţiunea dintre unda de şoc, provocată de suflul supernovei, şi masa ejectată în mediul interstelar.

Realizată cu o mare putere de rezoluţie, imaginea în domeniul X a restului supernovei lui Tycho Brahe se poate caracteriza prin trei componente dela care emană energia respectivă.

1) Învelişul exterior cu raza $R_0\approx 240''$ şi o grosime $\Delta N/R\approx 0,1$;

2) Un înveliş difuz cu raza exterioară $R_1\approx 216'$ şi $\Delta R/R\approx 0,2$;

3) Un număr de aproximativ 400 de condensări de substanță distribuite în învelișul difuz. Evaluarea maselor acestor componente duce la valorile 2,2 , 1,2 și respectiv 0,7 mase solare. Energia corespunzătoare este apreciată la $1{,}4 \cdot 10^{46}$ ergi.

Restul de supernovă Cassiopeia-A (Cas A) este o rămășiță a celei mai tinere supernove din Galaxie, iar cercetarea acestuia a dus la o înțelegere mai profundă a exploziilor de supernove. Este vorba de posibilitatea de a cerceta în amănunțime procesele legate de interacțiunea dintre unda de suflu și mediul înconjurător, formarea restului de supernovă prin colaps și modul în care materialul ejectat interacționează cu mediul interstelar.

Explozia de supernovă prin care s-a format restul Cas A, aparent, a rămas neobservată. Se pare că ea s-a produs cîndva între anii 1635 și 1671. Se apreciază că aici a avut loc explozia unei stele de vreo 100 de ori mai masivă decît Soarele. Numai în astfel de cazuri, cînd este vorba de explozia unor nuclee foarte masive, distrugerea este atît de puternică încît în urma ei nu mai rămîne „nimic". Iată un motiv pentru care explozia respectivă ar fi trecut neobservată.

Cu ajutorul unui telescop de la bordul satelitului „Einstein"(1973) s-au efectuat observații în domeniul X și s-a stabilit că restul Cas A are o structură circulară, în interiorul căreia se găsește sursa X de circa 4′ în diametru. În jurul regiunii circulare se află un „platou" care este responsabil de emisia radio, cu un diametru aparent de 5,5′ (minute de arc) și o grosime de cel puțin 0,5′. Această ultimă regiune este considerată a fi asociată cu frontul de șoc în expansiune.

În interiorul platoului exterior se găsesc anumite sisteme de noduri și filamente în expansiune, iar spectrul optic al acestora arată că aici este vorba de o îmbogățire cu elemente chimice produse prin nucleosinteza din timpul exploziei. Nodurile se mișcă foarte repede ca urmare a șocului exploziei, pe cînd filamentele care se mișcă încet ar fi o consecință a interacțiunii dintre materialul ejectat și mediul interstelar.

Aparatele de la bordul satelitului „Einstein" au arătat că nodurile sînt surse de emisii în domeniul X și se deplasează cu viteze diferite. Cele cu viteze mari sînt bogate în elemente O, S, Ar și Ca, pe cînd cele cu viteze mici sînt bogate în H

și N. Acest material „mobil" este considerat a proveni de la explozia de supernovă.

Spectrul X arată prezența liniilor de emisie ale magneziului, siliciului, calciului, fierului și argonului. Comparate cu hidrogenul, aceste elemente sînt de două ori mai abundente decît în Soare. Prin urmare, observarea resturilor tinere de supernove ne permite să „asistăm" la sinteza proaspătă a elementelor chimice. Abundența fierului arată că nucleosinteza a fost importantă în explozia respectivă.

Date importante a furnizat și satelitul EXOSAT, care a observat restul de supernovă Cas A în domeniul determinat de 0,5 și 2,5 keV.

Admițînd depărtarea lui Cas A de 2,8 kpc, se apreciază luminozitatea $L_x \approx 2{,}2 \cdot 10^{35}$ erg/s.

După cum se știe, exploziile de supernove lasă în urma lor stele neutronice care se observă sub formă de pulsari, dar pentru Cas A așa ceva nu s-a putut detecta. Foarte probabil că în cursul acestei explozii nu s-a format un astfel de rest. De aici s-ar putea trage concluzia că numărul mare de pulsari cunoscuți în Galaxie s-ar fi format, eventual, pe o altă cale.

Restul supernovei din 1006 a fost, pentru prima dată, identificat ca sursă X în urma analizei datelor observaționale furnizate de OSO-7, temperatura corespunzătoare fiind evaluată la $4{,}5 \cdot 10^7$ K. Ulterior, observațiile colectate de Ariel-5 au condus la temperatura de $1{,}9 \cdot 10^7$ K, aceasta din urmă fiind cam mică pentru a determina liniile de emisie ale fierului.

Sursa 4U 1043-59 a fost descoperită de satelitul UHURU, apoi a fost urmărită de către OSO-8 care a găsit rezultate concludente cu cele furnizate cu ocazia descoperirii. Temperatura este de $8{,}7 \cdot 10^7$ K, iar restul de supernovă este relativ tînăr.

Cygnus Loop (Bucla din Lebăda) a fost urmărită în domeniul X cu aparatele de la bordul satelitului „Copernicus", rezultatele obținute fiind bine corelate cu cele din domeniul optic. Spectrul în domeniul X sugerează o temperatură cuprinsă între $2 \cdot 10^6$ K și $4 \cdot 10^6$ K. Au fost remarcate liniile de emisie ale ionilor : O VII, O VIII și Fe XIV.

Trebuie menționat aici și faptul că detectarea liniei fierului (Fe XIV) la lungimea de undă $\lambda = 5\,303$ Å aduce un suport

pentru susținerea ipotezei privind producerea energiei radiate prin încălzirea plasmei la contactul cu unda de șoc a restului de supernovă. Prin urmare, se poate presupune că emisia X a Buclei din Lebăda este determinată de încălzirea plasmei prin lovirea ei de către unda de șoc. S-a evaluat vîrsta de 20 000 ani.

IC 443 este un rest de supernovă cu luminozitate Roentgen mică, fapt pentru care el se observă cu multă greutate. Totuși, o serie de observații recente au adus multe rezultate interesante.

Ca sursă X, restul de supernovă IC 443 a fost detectat de satelitul UHURU, rezultat confirmat mai tîrziu de OSO-7. Informații asupra acestui obiect au fost furnizate și de sateliții „Copernicus" și Ariel-5. Majoritatea rezultatelor astfel obținute sugerează faptul că emisia din domeniul X provine de la o regiune situată în partea de nord est a poziției în care sînt observate filamentele optice ale acestui obiect. S-a evaluat temperatura de 10^7 K și vîrsta de 6 000 ani [1].

Restul de supernovă Puppis-A este asemănător cu IC 443, ambele obiecte fiind resturi tinere în raport cu Cygnus Loop au dimensiuni mai mici și temperaturi mai mari. Puppis-A are foarte puține filamente optice, acest lucru fiind încă neînțeles. Datele culese de satelitul „Copernicus" arată că aici nu există o relație între distribuția superficială a strălucirilor în domeniul X și unde radio. Temperatura este apreciată la $3 \cdot 10^6 - 8 \cdot 10^6$ K.

Datele furnizate de „Copernicus" arată că, alături de regiunea fierbinte detectată de Ariel-5, în restul de supernovă Puppis A se găsește o regiune cu temperatura mai scăzută, situație care este destul de greu de explicat din punct de vedere teoretic.

După unii cercetători, printre sursele de radiații X asociate cu resturile de supernove trebuie să fie inclus și obiectul H 2027+9 situat la distanța de 50 pc, cu luminozitatea $L \approx \approx 10^{35}$ ergi și temperatura $\approx 10^6$ K. În schimb, alți cercetători sînt de părere că aici ar fi vorba de existența unui nor de

[1] În regiunea nebuloasei IC 443 se găsește pulsarul radio PSR 061+121 a cărui vîrstă este de circa 90 000 ani Din cauza diferenței dintre vîrstele acestor două obiecte se poate exclude orice legătură dintre ele.

hidrogen neutru, care ar avea o componentă asemănătoare cu un rest de supernovă.

Deși există peste 120 de resturi de supernove cunoscute, doar două dintre acestea s-au dovedit a fi asociate cu pulsari observați în domeniul radio: Pulsarul Crab și cel din Vela.

În afară de cele menționate mai sus, se cunosc multe resturi de supernove care sînt surse de radiații în domeniul X; aparatele de la bordul lui „Einstein" au adus multe date observaționale cu privire la problemele de acest fel. Astfel, de exemplu, restul de supernovă cunoscut sub notația W28 a fost observat în domeniul X, dar acesta este sursă importantă și pentru domeniul radiațiilor gama și radio. Acesta este asemănător cu restul de supernovă din Vela și are o legătură cu sursa de radiații gama 2CG 006−00.

De asemenea, satelitul „Einstein" a evidențiat prezența unei surse X în restul de supernovă RCW 103.

În constelația Aquila (Vulturul) se găsește restul de supernovă W 44 de la care s-au recepționat radiații X cu aparatele de la bordul satelitului olandez ANS. Acest rest de supernovă este sursa radio 3C 392.

5.6. Pulsari Roentgen — Pulsari X

Așa cum am mai amintit, pulsarii au fost descoperiți prin observații radio, dar, ulterior, ei au fost observați și în alte domenii spectrale. Pulsarul Crab are observații la toate lungimile de undă, pulsurile respective fiind sincrone (vezi fig. 2.6 și 2.7). În schimb, la Pulsarul Vela, pulsurile gama și cele radio nu sînt sincronizate. Apoi, există pulsari care se pot observa numai în anumite domenii spectrale, pulsarii Roentgen, de exemplu, fiind observați numai în domeniul X. De aceștia din urmă ne vom ocupa în paragraful prezent.

Cercetarea pulsarilor X a început o dată cu lansarea satelitului UHURU (1970) care, încă de la începutul activității lui, a descoperit două surse pulsatorii: Hercules X-1 cu perioada de succesiune a pulsarilor de 1,24 secunde și Centaurus X-3 cu perioada respectivă de 4,8 secunde.

„Întreruperea" periodică a emisiei X este ușor de explicat dacă admitem că „steaua" respectivă este membră a unui sistem binar. Aici sursa X — pulsarul — este periodic

eclipsată de către însoţitorul corespunzător care este presupus a fi o stea (normală) de pe secvenţa principală. În plus, la pulsarii X se observă variaţii regulate ale momentelor la care au loc impulsurile radiaţiei, variaţie care se poate explica prin efectul Doppler. Impulsurile vin mai repede cînd pulsarul se apropie de observator şi mai tîrziu cînd se îndepărtează. Cu alte cuvinte, în perioada de pulsaţie se evidenţiază o variaţie periodică. Astfel, de exemplu, s-a constatat că pulsarul Hercules X-1, cu perioada de pulsaţie 1,24 secunde, are o mişcare orbitală cu perioada de 1,7 zile. Pentru Centaurus X-3 s-a stabilit perioada orbitală de 2,1 zile.

În figura 5.3 sînt reproduse cele două curbe de lumină, în domeniul optic şi respectiv X, pentru cazul pulsarilor Roentgen. De aici rezultă că strălucirea în domeniul optic variază în mod continuu, trecînd de la o valoare minimă la una maximă şi invers, în timp ce curba radiaţiilor X are o intensitate constantă, după care se înregistrează o scădere bruscă spre minimul principal şi apoi o revenire spre maximum.

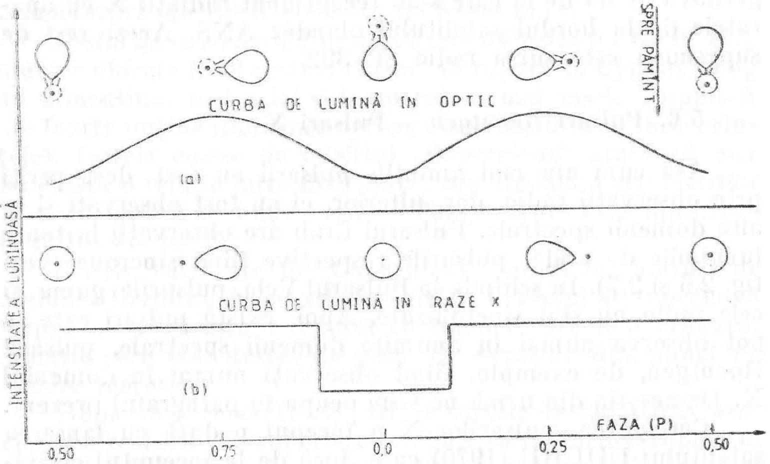


Fig. 5.3. Explicarea aspectelor curbelor de lumină în domeniile optic şi X pentru pulsarii Roentgen: (a) Curba de lumină în domeniul optic, strălucirea este minimă atunci cînd componenta „optică" se prezintă cu arie minimă spre observatorul terestru; (b) Curba de lumină în domeniul X, strălucirea devine minimă atunci cînd steaua neutronică este eclipsată de către componenta „optică".

Pentru explicarea acestor curbe de lumină s-a considerat că stelele duble cu surse de radiaţii în domeniul X constau dintr-o stea optică mare care este deformată sub acţiunea forţei gravitaţionale a unei stele mici, dar masive, aceasta din urmă fiind sursa X. În figura 5.3 se vede că pe măsură ce ambele componente se vor mişca în raport cu centrul lor comun de greutate, ele vor avea poziţii relativ diferite în raport cu observatorul terestru. Steaua optică, fiind deformată, va prezenta arii diferite şi, prin aceasta, strălucire diferită spre observator. Astfel, variaţia strălucirii în domeniul optic poate fi explicată prin trecerile succesive prin valori minime şi maxime ale strălucirii corespunzătoare la diferite momente.

În figura 5.3, componenta mai mică este considerată a fi sursă X şi are intensitate constantă, cu excepţia intervalului de timp cînd ea este supusă eclipsării de către componenta optică. În acest mod, radiaţia X are intensitate minimă sau zero atîta timp cît ea se găseşte acoperită de către steaua optică.

Prezentăm aici cîteva dintre caracteristicile mai importante ale unor pulsari X – pulsari Roentgen.

Hercule X-1 a fost descoperit de satelitul UHURU, iar datele observaţionale au permis să se stabilească trei periodicităţi: a) o perioadă de pulsaţie cu durata de 1,24 secunde aceasta reprezentînd perioada de rotaţie axială a stelei neutronice din acest sistem, b) o perioadă orbitală de 1,7 zile şi c) o perioadă lungă de aproximativ 35 zile, aceasta din urmă fiind timpul necesar pentru ca materia să revină la condiţiile de emisie ale radiaţiilor în domeniul X.

Unii pulsari X au fost urmăriţi şi cu telescoapele optice de la sol şi s-au identificat obiectele optice corespunzătoare. Astfel de observaţii au stabilit identitatea dintre Hercules X-1 şi steaua variabilă HZ Herculis. La aceasta din urmă s-a determinat, pe cale optică, perioada orbitală de 1,7 zile.

În cazul sursei Hercules X-1 = HZ Herculis componenta principală este o stea neutronică şi este responsabilă de emisia în domeniul X, pe cînd secundara este o stea normală de culoare albastră. Din determinarea perioadelor şi

variațiilor lor se determină masa stelei neutronice. În acest scop se utilizează funcția de masă, care pentru Hercules X-1 este

$$f(\mathfrak{M}) = \frac{\mathfrak{M} \sin^3 i}{(\mathfrak{M} + \mathfrak{M}_x)^2} = 1{,}69 \,.\, 10^{33} \text{ g} = 0{,}85 \, \mathfrak{M}_\odot$$

unde $\mathfrak{M}$ este masa stelei normale, $\mathfrak{M}_x$ reprezintă masa stelei neutronice iar i este înclinarea planului orbital. Considerînd cunoscută masa $\mathfrak{M}$, pentru valorile extreme posibile ale lui i rezultă că $\mathfrak{M}_x$ este cuprinsă între 0,5 și 0,8 mase solare.

Cea mai probabilă explicație a perioadei de 35 zile este aceea prin care se presupune că discul de acreție este supus unui efect de precesie. În acest caz se admite că discul respectiv „blochează", pentru observatorul terestru, în proporție de 70% regiunea centrală care determină emisia X. O astfel de presupunere explică multe din caracteristicile observate, cum ar fi, de exemplu, lărgimea eclipselor.

Prin intermediul unor observații efectuate cu aparatele de la bordul unui balon, lansat de către cercetătorii de la „Max Planck Institute", în spectrul lui Hercules X-1 s-a pus în evidență prezența unei linii de emisie la lungimea de undă căreia îi corespunde energia de 58 keV. Aceasta este interpretată ca o emisie de rezonanță ciclotron într-un cîmp magnetic de circa 50.10^{12} Gs.

În vara anului 1983, Hercules X-1 a fost observată cu aparatele de la bordul lui EXOSAT și s-a pus în evidență o emisie de intensitate redusă și care ar fi determinată de discul de acreție.

În anul 1985 s-a constatat că fluxul de radiații X al lui Hercules X-1 suferă o eclipsare produsă de către steaua însoțitoare.

În domeniul ultraviolet, Hercules X-1 a fost observată cu aparatele de la bordul satelitului IUE la lungimile de undă 1 550 Å $\leqslant \lambda \leqslant$ 1 950 Å și 2 000 Å $< \lambda <$ 3 200 Å. S-au pus în evidență liniile de emisie N V (λ = 1 200 Å) și C IV (λ = = 1 550 Å) suprapuse peste un spectru continuu. Cu o intensitate ceva mai slabă au fost detectate liniile elementelor: Ne II, Si IV, O V, N IV și N III. Foarte probabil că spectrul continuu este determinat de suprapunerea unui mare număr de linii de emisie. Prin urmare, observațiile în ultraviolet arată

că în jurul stelei HZ Herculis = Hercules X-1 există o plasmă puternic fotoionizată.

În anul 1983, pentru Centaurus X-3 a fost identificat obiectul optic corespunzător care este de magnitudinea m = 13, el fiind o stea supergigantă de tipul OB. Depărtarea pînă la această sursă este de 10 kpc și are funcția de masă $f(\mathfrak{M})$ = 15,6 mase solare.

Sursa Centaurus X-1 a fost observată în aprilie și mai 1982 cu aparatele de la bordul satelitului japonez HAKUCHO. Din datele observaționale astfel obținute s-a ameliorat durata perioadei orbitale P_{orb} = 41,524 zile. Cu toate acestea, observațiile înregistrate de SAS-3 conduc la perioada P_{orb} = 22,6 zile. Apoi, din combinarea observațiilor furnizate de Ariel-5 și SAS-3 a rezultat P_{orb} = 35 zile, cu excentricitatea orbitei e = 0,44.

Despre Centaurus X-3 se presupune că este un sistem binar în care obiectul compact, sursa de radiații X, se mișcă pe o orbită în jurul unei stele de tipul spectral Be. Componenta normală își umple lobul său Roche, iar scurgerea de masă de aici determină un disc de acreție. Observațiile din aprilie 1982 evidențiază un fel de încetinire a mișcării orbitale cu rata de 2.10^{-7} cm/s. De altfel UHURU a semnalat o descreștere în durata perioadei orbitale a lui Centaurus X-3.

Cu aparatele de la bordul lui Ariel-5, între noiembrie 1974 și mai 1978 s-au obținut date observaționale privind pulsarul X cunoscut sub notațiile GX 301-2 sau 2U 1 223-62 cu perioada de erupție de 696 secunde, la care s-a determinat perioada orbitală de 41,4 zile, orbita corespunzătoare fiind eliptică (e = 0,47), erupțiile producîndu-se la numai cîteva zile înainte de trecerea prin periastru.

La 14 noiembrie 1983, cu satelitul japonez TENMA, destinat astronomiei X, s-a descoperit o nouă sursă în constelația Perseus. Strălucirea acesteia este variabilă la scala de timp de ordinul milisecundelor. S-a constatat că aceasta coincide cu sursa V 0332 + 53, care a erupt în iunie 1973 și care fusese înregistrată de satelitul american Vela 5B la coordonatele ecuatoriale $\alpha = 03^h32^m$ și $\delta = +53^\circ$. Variabilitatea acestei surse a fost confirmată și prin observațiile colectate de satelitul EXOSAT. În plus, în februarie 1984, la această sursă s-a mai pus în evidență variabilitatea la

scala de timp de 4,4 secunde. Această ultimă perioadă descrește lent, descreșterea respectivă fiind în acord bun cu ipoteza prezenței unui sistem binar.

Sursa *4U 1626-67*, de asemenea un pulsar Roentgen, are perioada de pulsație de 7,68 secunde, iar perioada orbitală este apreciată a fi doar de 41 minute. De aceea, aici se exclude posibilitatea ca steaua normală să fie o stea gigantă sau supergigantă de tipul BI. Foarte probabil că steaua însoțitoare este o pitică albă de tip tîrziu.

Satelitul EXOSAT a stabilit variația periodică a fluxului de radiații X emis de sursa 4U 1 820-30. Perioada de variație a acestuia s-a dovedit a fi de 685 secunde (11,8 minute). Se fac speculații cu privire la existența unor perioade orbitale așa de scurte și se consideră că trebuie să existe un sistem binar atît de strîns.

Perioade orbitale foarte scurte au mai fost determinate și la pulsarii X : A 1 186-61 (P_{orb}=6,755 minute), 4U 1 627-67 (P_{orb} = 41 minute), PG 1 346 + 082 (P_{orb} = 25 minute). Dar perioadele orbitale foarte scurte, dacă ele există, ridică probleme cu privire la ultimele stadii din evoluția stelară și, zicem noi, atrag atenția asupra condițiilor în care se stabilesc expresiile suprafețelor echipotențiale.

*

Atît pulsarii X, cît și cei radio, sînt reprezentați prin stele neutronice în rotație și cu un intens cîmp magnetic. Cu toate acestea, mecanismele prin care se produc pulsurile respective sînt complet deosebite. În primul rînd, pulsarii X sînt lipsiți de pulsuri observabile în domeniul radio.

Dacă sursa de energie a pulsarilor radio este determinată de rotația stelei neutronice, la pulsarii X emisia de energie este o consecință a eliberării de energie gravitațională care are loc atunci cînd substanța pierdută de componenta normală cade pe suprafața stelei neutronice (vezi figura 5.5) .

După cum se știe, steaua neutronică posedă un mare potențial gravitațional. De aceea, materia care vine de la steaua normală va fi puternic atrasă spre suprafața stelei neutronice, forțînd-o să se miște cu o viteză de pînă la o treime din viteza luminii. De aceea, la izbirea de suprafața stelei neutronice, circa 10 — 15% din energia de repaus va fi transformată în energie radiativă (mc^2). Calculele arată că pentru

a asigura luminozitățile de ordinul a 10^{36} — 10^{38} erg/s, care se observă la sursele X, este necesar ca pe suprafața stelei neutronice să cadă vreo 10^{-11} — 10^{-9} mase solare pe an. Astfel de calcule sînt în acord cu datele observaționale.

În apropiere de suprafața stelei neutronice, masa ejectată de însoțitor este supusă și acțiunii cîmpului magnetic- fapt pentru care este de așteptat ca pe suprafața stelei neutronice să existe regiuni preferențiale pentru căderea de masă. Se pot forma astfel niște „pete" luminoase care să emită radiații X. De aceea, dacă axa magnetică a stelei neutronice nu coincide cu axa de rotație, observatorul vede pata respectivă la momente diferite, cu intensități diferite — fenomenul de far. Astfel se înregistrează energia emisă sub formă de pulsuri.

O altă deosebire dintre pulsarii X și radio se referă la duratele perioadelor de pulsație. Așa cum am mai amintit (vezi paragraful 2.6 b), pulsarii radio (singuratici) își încetinesc rotația, pe cînd pulsarii X din sistemele binare suferă o accelerare în rotație, accelerarea respectivă fiind determinată de faptul că acestora din urmă li se imprimă energie cinetică suplimentară de rotație. Această accelerare duce la micșorarea treptată a perioadei de pulsație cu o rată de 5 milisecunde pe an pentru Hercules X-1 și 1 000 microsecunde pe an pentru Centaurus X-3.

5.7. Bursteri de radiații X. Noi surse Roentgen

În cea de-a doua jumătate a anilor '70 s-a descoperit o nouă clasă de obiecte cu emisie în domeniul X. Este vorba de niște surse care se manifestă prin erupții violente și destul de frecvente, în literatura de specialitate fiind cunoscute sub denumirea de bursteri de radiații X (X-ray bursters). În decursul unei erupții, luminozitatea X crește de zeci de ori sau chiar mai mult, într-o singură secundă. Numai în domeniul X, o sursă de acest fel emite o cantitate de energie de cel puțin 10 000 de ori mai mare decît energia emisă de Soare pe toate lungimile de undă.

La bursteri în locul pulsațiilor se observă erupții cvasiregulate, cu durata de desfășurare de ordinul secundelor sau chiar minutelor, duratele dintre erupții fiind de ordinul orelor.

O erupţie tipică (burst) este caracterizată printr-un timp de creştere a strălucirii de cîteva secunde, pe cînd timpul de revenire (descreştere) poate fi de ordinul minutelor sau orelor.

În decembrie 1975, din examinarea datelor furnizate de satelitul SAS-3, s-a pus în evidenţă o erupţie enormă în domeniul X în roiul stelar globular NGC 6624 din Sagittarius, nu departe de locul unde, pe bolta cerească, se proiectează centrul Galaxiei noastre. Această erupţie, legată de sursa X cunoscută mai înainte sub notaţia 3U 1820-30, era cu totul diferită de erupţiile anterior înregistrate.

Cu satelitul SAS-3 s-au înregistrat 10 erupţii ale sursei X din NGC 6624, acestea fiind separate între ele prin intervalul de timp de circa 4,5 ore. Totuşi, deoarece acest interval de timp nu se păstra riguros constant, pentru obiectul respectiv nu s-a putut stabili o periodicitate fermă. Observaţiile din ianuarie 1976 nu au detectat erupţii la sursa X din NGC 6624, în schimb au semnalat astfel de fenomene în interiorul altor roiuri stelare. În martie 1976, în decurs de patru zile, bursterul din NGC 6624 şi-a redus intervalul dintre erupţii de la 3,4 la 2,2 ore.

În februarie 1976 s-au descoperit alte trei surse de erupţii X, la numai cîteva grade de la centrul galactic. În martie s-au mai găsit două surse cu astfel de erupţii, dintre care una este burster X şi are notaţia MXB 1730-335 ; aceasta înseamnă burster X descoperit de cercetătorii de la Massachusetts Institute of Technology (MIT) şi are coordonatele ecuatoriale : $\alpha = 17$ h 30 m, $\delta = -33{,}5°$.

La bursterul MXB 1730-335 s-au înregistrat peste 40 000 erupţii pe zi, timpul de succesiune al acestora fiind cuprins între 10 secunde şi cîteva minute. Aici, cu cît o erupţie este mai puternică cu atît va trece mai mult timp pînă la apariţia erupţiei următoare.

În anul 1977, cercetătorii de la MIT au descoperit alţi 12 bursteri X, dar nici unul din ei nu era atît de spectaculos ca bursterul MXB 1730-335, erupţiile lor repetîndu-se după intervale de timp de ordinul orelor sau chiar zilelor. De aici a apărut ideea că bursterul MXB 1730-335 trebuie să fie determinat de un mecanism cu totul diferit de mecanismele care determină erupţiile bursterilor „obişnuiţi".

Bursterul MXB 1730-335 a fost urmărit şi cu aparatele de la bordul satelitului japonez HAKUCHO (Lebăda). A fost surprins începutul fazei de activitate din august 1979, faza activităţii precedente fiind încheiată în martie 1979. În primele 10 zile ale noii faze de activitate, bursterul a emis impulsuri X de o formă surprinzătoare. Dacă în erupţiile obişnuite, observate anterior, creşterea bruscă a fluxului X era urmată de o descreştere de asemenea bruscă — impulsuri cu vîrfuri ascuţite, în erupţiile înregistrate de cercetătorii japonezi după creşterea rapidă a fluxului de radiaţii X a urmat o fază de invariabilitate (luminozitate constantă la maximul de strălucire) care a durat circa 10 minute. Este vorba de nişte impulsuri cu aspect de trapez.

Cu ajutorul observaţiilor în infraroşu ($\lambda = 2{,}2$ μm), în direcţia bursterului MXB 1730-335 s-a descoperit un roi stelar globular la care, probabil, aparţine această sursă. În august şi septembrie 1979 s-au înregistrat două erupţii radio de la acest burster. Ele au durat 24 şi respectiv 146 secunde, dar nu s-a putut stabili o corelaţie între rezultatele obţinute în diferite domenii spectrale.

În luna octombrie 1977 s-a constatat că bursterul MXB 1730-335, în afară de rafalele lui obişnuite, care au fost amintite mai sus, se mai manifestă prin nişte erupţii care au loc la fiecare 3 sau 4 ore. Aceste ultime erupţii sînt asemănătoare cu cele observate şi la alte surse X.

Distribuţia spaţială a bursterilor este analogă cu aceea a stelelor din subsistemul sferic (Populaţia II), cu o mare concentraţie spre centrul galactic. Ei sînt situaţi la o depărtare maximă de circa 30 000 ani lumină în raport cu Soarele. Din fluxul observat al energiei emise şi depărtarea amintită se apreciază că în timpul unei erupţii, în medie, se eliberează o cantitate de energie de vreo 10^{39} ergi, energie egală cu aceea pe care Soarele o emite într-o jumătate de săptămînă.

Spectrele optice ale bursterilor X se deosebesc puternic de spectrele stelelor ordinare. Liniile de absorbţie sînt absente, iar liniile de emisie se suprapun peste un spectru continuu. O situaţie asemănătoare a fost semnalată şi în cazul sursei Scorpius X-1, precum şi la minimul de strălucire al unor stele variabile cataclismice.

Gradul de regularitate al surselor X cu erupţii diferă foarte mult de la un caz la altul. La anumite surse, erupţiile se reproduc cu precizie mare. Astfel, de exemplu, sursa MXB 1659-29, descoperită în octombrie 1977, avea perioada de 2,4 ore şi se prevedeau apariţiile noilor erupţii cu o precizie de cîteva minute. În alte cazuri, însă, intervalul de timp scurs între două erupţii succesive poate avea variaţii de ordinul orelor sau chiar al zilelor, anumite erupţii putînd chiar să dispară pentru mai multe zile. Unele surse de acest fel au devenit inactive pentru mai multe luni sau chiar ani. Curba de lumină a unui burster este reprodusă, schematic, în figura 5.4. Aici $\Delta t_b \leqslant 1^s$ este timpul de creştere a luminozităţii de la nivelul staţionar, L_0, la nivelul maxim, L_b.

$\Delta t_b \simeq 3-10^s$ este durata erupţiei, iar $t_b \simeq 1-10$ ore este timpul scurs între două erupţii succesive.

Luminozitatea maximă este $L_b \simeq 10^{39}-10^{40}$ ergi/s. Aproape toţi bursterii au luminozitatea de fond constantă $L_0 \approx 10^{37}$ ergi/s.

În iunie 1987, cu telescopul de 1,5 m de la Observatorul Interamerican de la Cerro Tololo (Chile) s-a urmărit corespondentul optic al bursterului MXB 1735-44. Este vorba de o stea albastră, la care energia totală emisă în domeniul optic este de 1/50 000 din energia emisă în cursul unei erupţii Roentgen.

După intervalele de timp dintre erupţii, bursterii X pot fi grupaţi în două clase. Bursterii din prima clasă au inter-

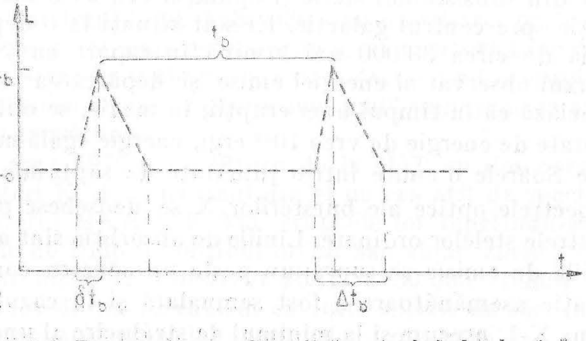


Fig. 5.4. Reprezentarea schematică a curbei de lumină a unui burster.

valele de timp dintre două erupţii de ordinul orelor sau zilelor, pe cînd în clasa a doua ar intra acei bursteri la care intervalele dintre erupţii sînt mult mai mici — bursteri rapizi.

Despre bursterii din prima clasă se presupune că sînt rezultatul unor „scînteieri" termonucleare produse prin aprinderea gazului acumulat lîngă suprafaţa unei stele neutronice; se presupune că astfel de fenomene sînt accidentale.

Pentru bursterii din clasa a doua s-au sugerat mecanisme diferite pentru erupţii diferite, acestea fiind determinate de unele instabilităţi de lîngă polii magnetici ai stelei neutronice care sînt membre ale unor sisteme stelare duble.

5.8. Surse X asemănătoare novelor. Surse Roentgen temporare

Una dintre cele mai surprinzătoare descoperiri din ultimul timp o reprezintă sursele X cu erupţii „lung periodice". Încă de la primele observaţii ale cerului cu aparatele amplasate pe rachete s-a pus în evidenţă existenţa unei clase de surse X care, pe neaşteptate, apar pe sfera cerească cu luminozităţi diferite, deşi pulsaţiile continuă să se producă cu aceeaşi perioadă.

La aceste obiecte, în cîteva zile, pe lîngă fenomenul pulsatoriu, luminozitatea creşte rapid şi, pentru cîteva săptămîni sau luni, ele sînt cele mai luminoase surse X de pe bolta cerească. Observaţiile, efectuate cu aparatele de la bordul unor sateliţi artificiali, au arătat că astfel de fenomene se înregistrează destul de frecvent, vreo zece descoperiri pe an. Din cauza asemănării care există între variaţia strălucirii lor şi variaţiile corespunzătoare ale novelor, aceste obiecte au fost numite *surse X asemănătoare novelor*.

Observaţiile efectuate cu aparatele de la bordul sateliţilor SAS-3 şi HEAO-1 au permis să se determine poziţia surselor X asemănătoare novelor, cu o precizie de ordinul a 20 secunde de arc, fapt care a contribuit la identificarea unora dintre ele cu obiectele optice corespunzătoare.

La sfîrşitul anului 1974, în constelaţia Centaurus a erupt o sursă X (A 1118-64) pentru care s-a determinat perioada de 6,75 minute. Această sursă, în limitele erorilor de determinare a poziţiei, coincide cu steaua variabilă RS Centauri,

aceasta din urmă avînd perioada de variație a strălucirii de 144 zile.

La sfîrșitul lunii aprilie 1975, în constelația Taurus a erupt o sursă X (A 0535+26) care are perioada de pulsație de 104 secunde. A ajuns la strălucirea maximă în mai, iar în iunie a devenit invizibilă. Dar, spre marea surprindere a observatorilor, în luna noiembrie a aceluiași an, sursa respectivă a reapărut, perioada pulsațiilor rămînînd aceeași ca mai înainte, de 104 secunde.

Satelitul Ariel-5 a descoperit sursa X A 1524-61 care, la data de 22 noiembrie, a avut o creștere imensă a strălucirii, apoi, la numai 12 zile după descoperire, a urmat o creștere și mai mare, sursa devenind comparabilă cu Nebuloasa Crab.

Cu ajutorul aparatelor de la bordul lui Ariel-5, la 3 august 1975 a fost identificată nova A 0620-00. Aceasta este prototipul novelor de radiații X și a fost identificată cu nova optică cunoscută sub notația V_{616} Monocerotis. Fluxul radiației X a crescut foarte repede; într-un timp foarte scurt, aceasta a devenit mai strălucitoare decît Scorpius X-1. Totuși, observațiile spectroscopice nu au detectat linii de emisie sau de absorbție. În ipoteza că această sursă se găsește la distanța de 500 parseci de la noi, pentru erupția din 3 august 1975 s-a evaluat luminozitatea de circa 10^{34} erg/s. La maximul de strălucire, o astfel de nova poate să ajungă pînă la 4.10^{37} erg/s.

Foarte probabil că V_{616} Monocerotis este un sistem stelar dublu, în care componenta principală este o stea neutronică sau gaură neagră, iar secundara ar fi o stea cu masă mai mică, dar care aparține la unul din tipurile spectrale tîrzii. Deoarece însoțitorul stelei neutronice nu-și umple lobul Roche, transferul de masă este determinat de vîntul stelar. Masa „ejectată" de însoțitor ajunge la steaua neutronică pentru a determina producerea de radiații X, dar numai după ce, în prealabil, a fost „depozitată" într-un fel de disc. Prin acțiunea vîntului stelar, masa discului de acreție crește și, atunci cînd cantitatea respectivă a depășit o anumită limită, o parte însemnată din ea „coboară" spre steaua relativistă și determină erupția de radiații X. Schematic, acest proces este reprezentat în figura 5. 5b.

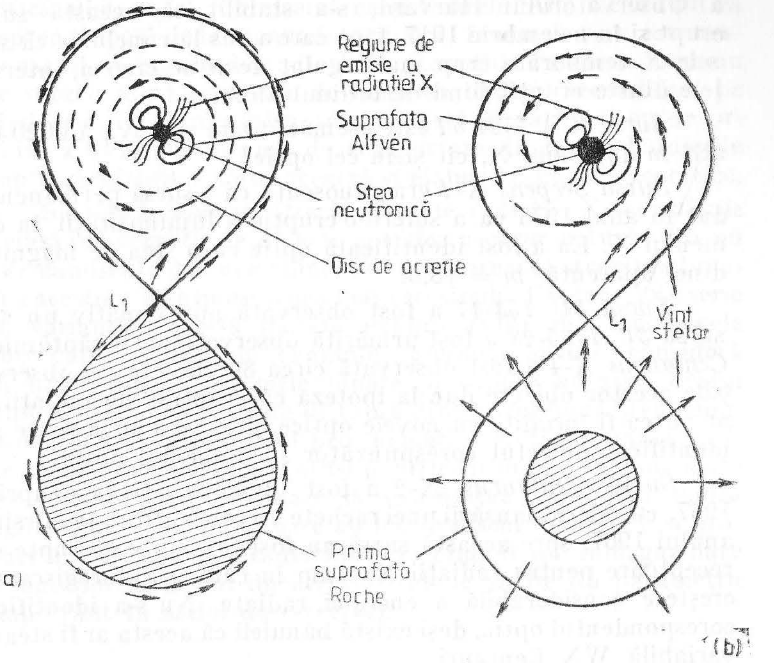


Fig. 5.5. Reprezentarea schematică a unui model de pulsar X:
(a) transferul de masă are loc prin primul punct lagrangian L_1
(b) acreția de masă este condiționată de vîntul stelar.

Presupunînd că a avut loc o anumită erupție, următoarea se va produce numai după ce se va acumula altă masă în discul de acreție. De aceea, fiecare novă X trebuie să erupă destul de regulat; intervalele de timp dintre erupții depind de intensitatea vîntului stelar, precum și de alți parametri ai obiectului respectiv. Se bănuiește că sursa A 0620-00 ar avea perioada orbitală de circa 8 zile.

Corespondentul optic a lui A 0620-00 fiind destul de strălucitor ($m_{max} = 12$), era de așteptat ca această stea să fi fost observată și cu alte ocazii. Astfel, din examinarea unui număr de peste 500 plăci fotografice din biblioteca de sticlă

a Observatorului Harvard, s-a stabilit că această sursă erupt și în noiembrie 1917, fapt care a dus la concluzia că sursele X temporare erup mai regulat decît se credea, intervalele dintre erupții fiind de ordinul anilor.

Sursa X A 1524-61 este asemănătoare cu nova A 0620-00, atît în domeniul X, cît și în cel optic.

Sursa Serpens X-1 era cunoscută ca o sursă permanentă, dar în anul 1975 ea a suferit o erupție a luminozității în domeniul X. Ea a fost identificată optic cu o stea de magnitudine aparentă $m = 18{,}5$.

Sursa 3U 154-47 a fost observată aproximativ un an; sursa *3U 1735-28* a fost urmărită observațional o săptămînă, *Centaurus X-4* a fost observată circa 80 zile etc. Și observațiile acestor obiecte duc la ipoteza că erupțiile de radiații X ar putea fi înrudite cu novele optice, deși încă nu la toate s-a identificat obiectul corespunzător în domeniul optic.

Sursa Centaurus X-2 a fost descoperită la 4 aprilie 1967, cu ocazia lansării unei rachete Aerobee. Pînă la sfîrșitul anului 1967, spre această sursă au fost orientate de șapte or receptoare pentru radiații X, timp în care s-a înregistrat o creștere considerabilă a energiei radiate. Nu s-a identificat corespondentul optic, deși există bănuieli că acesta ar fi steaua variabilă WX Centauri.

Sursa Centaurus X-4 a fost descoperită la 8 iulie 1967, descreșterea strălucirii avînd o pantă mult mai mare decît aceea din cazul lui Centaurus X-2. Nu se cunoaște corespondentul optic.

Cu ajutorul lui Ariel-5, la 31 august 1977, s-a observat erupția în domeniul X a novei optice *Nova Ophiuchi 1977*, cînd intensitatea maximă era de 0,43 din aceea a Nebuloasei Crab. Această novă a fost observată și de satelitul HEAO-1, care a înregistrat-o la data de 8 septembrie 1977.

După cum se știe, SS Cygni este o novă pitică recurentă, are variația strălucirii cuprinsă între 8,2 și 12,1 magnitudini stelare. Dar, deși aceasta a fost urmărită observațional mult timp în domeniul optic, încă nu dispunem de o durată precisă a perioadei. Și această novă a fost observată în domeniul X, iar observațiile respective au condus la ipoteza că ea ar fi alcătuită din două componente dintre care una este o stea

pitică albă, la fel de masivă ca și Soarele. Aici steaua pitică captează masă de la steaua însoțitoare, fenomen care este responsabil de emisia de radiații X. Erupțiile în acest domeniu se succed după intervale de timp de ordinul secundelor, pe cînd cele din domeniul optic se repetă după un timp de ordinul zilelor. Acest mod de comportare dă multă bătaie de cap cercetătorilor care încearcă să elaboreze modele teoretice.

Sursele temporare (trecătoare) de radiații X constituie o clasă importantă de obiecte cosmice a căror natură încă nu este cunoscută destul de bine. Se pare totuși că structura binară a acestora este ipoteza cea mai verosimilă. Evident, cu o serie de variante, această ipoteză explică multe din fenomenele observate. Astfel, de exemplu, anumiți autori consideră că unele dintre sistemele binare presupuse ar avea orbita eliptică, fapt pentru care distanța dintre cele două stele componente este variabilă, și prin urmare, acreția de masă va fi de asemenea variabilă. Totuși pentru viitor sînt recomandate noi cercetări teoretice care să examineze cu și mai multă rigoare procesele fizice care au loc în discul de acreție și producția propriu-zisă a radiațiilor X. Timpul de înmagazinare a materiei în discul de acreție trebuie să fie un parametru important în astfel de cercetări.

5.9. Surse X în roiuri stelare globulare

Detectarea surselor X în roiurile globulare a constituit o mare surpriză atunci cînd trei surse de acest fel au fost descoperite de către UHURU, încă din primele zile de activitate. Luminozitatea X a acestora este $L_x \approx 10^{36} - 10^{37}$ erg/s și este supusă unor variații, pentru mecanismul principal care stă la baza emisiei, fiind presupusă acreția de masă pe o stea neutronică sau o gaură neagră. Dar prezența unor astfel de corpuri nu era bănuită în roiurile stelare, deoarece în astfel de formațiuni sînt improbabile exploziile de supernove care lasă în urma lor obiecte colapsate.

Datele observaționale au arătat că cel puțin 18 surse X galactice au fost detectate în 7 roiuri stelare globulare. Spre deosebire de sursele X care se găsesc în afara roiurilor și sînt foarte tinere, sursele din roiurile globulare sînt foarte vechi. Se știe că roiurile globulare se numără printre cele mai vechi

formațiuni din Galaxie, iar stelele componente sînt considerate a fi de aceeași vîrstă ca și însuși sistemul nostru stelar.

Între sursele X din roiuri și cele situate undeva în afară există o mare deosebire în privința frecvenței de apariție. Din aproximativ 10^{11} stele ale discului galactic, cel puțin 100 sînt surse X, sau circa o stea dintr-un miliard. Dar, în cazul roiurilor globulare numai o stea din 10 milioane devine sursă X. Prin urmare, în roiurile globulare, apariția surselor X este de circa 100 — 1 000 de ori mai frecventă.

Cele mai multe surse X din roiuri sînt situate spre regiunile centrale, unde densitatea stelară este mai mare. Astfel de constatări îi îndreptățesc pe astrofizicieni să presupună că sursele X din roiuri și cele din exteriorul lor au origini foarte diferite.

Cu privire la natura surselor X din roiurile stelare globulare, astrofizicienii arată că și aici ar putea fi vorba de niște stele duble strînse, dar aici nu ar fi cupluri de stele care și-au început viața împreună, ci ar fi niște perechi formate prin captare. Se consideră că o stea mai masivă a evoluat mult mai repede, a devenit obiect colapsat și a captat o stea ordinară, care s-a întîmplat să treacă prin apropiere. Astfel de captări sînt posibile în roiurile cu densitate stelară mare.

Într-o altă ipoteză, privind natura surselor X din roiurile stelare, se consideră că în cursul evoluției stelare în interiorul unui roi s-au format mai multe găuri negre (obiecte colapsate) care, cu timpul, s-au unit și au alcătuit o gaură neagră centrală. Un astfel de obiect devine sursă X dacă gazul din interiorul roiului are o cădere spre centrul corespunzător. Dar, după cum se știe, roiurile stelare sînt formațiuni cu un mic conținut de gaz, această lipsă putînd fi, eventual, completată de pierderea de masă a stelelor gigante roșii.

O gaură neagră din regiunea centrală a unui roi de stele ar trebui să aibă masa egală cu 100 — 1 000 mase solare.

Rezultatele observaționale de la începutul anilor '80 au arătat că roiurile globulare NGC 5139 (ω Centauri) și NGC 6656 (M22 în Taurus) conțin mai multe surse X. Iată de ce, pentru a susține una dintre cele două ipoteze de mai sus, sînt necesare noi observații; o cercetare a variabilității acestora ar fi deosebit de utilă.

5.10. Observarea nebuloaselor galactice în domeniul X

După cum se știe, Nebuloasa din Orion este o regiune în care are loc formarea stelelor; ea are o vîrstă de ordinul a 10^7 ani, iar ca sursă X a fost identificată încă cu aparatele de la bordul lui UHURU, prin anul 1974. Apoi, sateliții Ariel-5 în 1977, ANS în 1978 și ulterior SAS-3 au confirmat rezultatele lui UHURU. Este vorba de o regiune cu raza de 35′ centrată pe *Trapezul din Orion*, care emite radiații X (vezi figura 3.2).

Cu satelitul „Einstein" s-au obținut rezultate care arată că cea mai mare parte din emisia X care provine de la Nebuloasa din Orion este determinată de existența a cel puțin 23 surse discrete, dar aglomerarea mare de obiecte stelare în regiunea respectivă împiedică identificarea individuală a surselor respective. Au fost cercetate proprietățile generale ale surselor descoperite și s-a constatat că sursa cea mai puternică este reprezentată printr-o asociație de stele tinere de tipul spectral O sau B, identificarea respectivă fiind efectuată de către SAS-3. Celelalte componente sînt stele variabile asociate cu sursele C.

În plus, față de cele 23 surse X discrete, există evidențe pentru prezența unei emisii difuze de radiații X, o parte din acestea putînd fi atribuită unui conglomerat de surse individuale slabe.

De la *Nebuloasa Eta Carinae* primele radiații X au fost înregistrate în anul 1970, în acest scop fiind utilizate receptoarele de pe o rachetă. Apoi s-au utilizat aparatele purtate de sateliți artificiali: „Copernicus" (1974), Ariel-5 (1976), OSO-8 (1978) și UHURU (1978). Dar, din cauza puterii mici de detectare a aparatelor de la bordul acestora, rezultatele obținute erau umbrite de oarecari îndoieli. Abia cu aparatele purtate de satelitul „Einstein" s-a putut stabili faptul că în regiunea în care este situată Eta Carinae se găsește o sursă bogată de radiații X.

Nebuloasa Eta Carinae ridică o serie de probleme atît pentru domeniul X, cît și pentru celelalte domenii spectrale. De aceea, asupra acesteia vom reveni, cu o prezentare mai detaliată, în capitolul 7. Aici amintim doar faptul că pentru mecanismul care stă la baza emisiei de radiații X în regiunea

lui Eta Carinae se fac presupuneri cu privire la prezenţa unor resturi de supernove sau prezenţa unui gaz fierbinte, dar nici una dintre aceste presupuneri nu asigură explicaţii satisfăcătoare.

Înainte de a încheia prezentarea surselor X din Galaxie amintim că acestea se pot împărţi în două categorii : surse din disc şi surse din bulbul galactic, care există alături de cele din roiurile globulare.

Despre sursele din discul galactic am spus cîte ceva în rîndurile precedente, de aceea rămîne să mai facem unele precizări cu privire la sursele X din bulbul galactic.

Se presupune că în centrul Galaxiei ar exista un obiect masiv colapsat cu moment unghiular foarte mare (rotaţia axială foarte rapidă). În aceste condiţii, bulbul galactic ar conţine o gaură neagră (black hole) cu o vîrstă de peste 10^8 ani şi un disc de acreţie corespunzător. Erupţiile de radiaţii X, detectate aici, ar fi nişte „scînteieri" nucleare care se produc în interiorul degenerat al discului. Se apreciază că raportul dintre luminozitatea X şi cea optică este de 1 000 : 1.

5.11. Surse X extragalactice

Satelitul UHURU a pus în evidenţă existenţa a peste 60 de surse X situate la latitudini galactice mari. Dintre acestea, mai bine de jumătate sînt de natură extragalactică. Prezentăm aici cîteva dintre cele mai remarcabile rezultate obţinute de astronomia extragalactică în domeniul X.

Norul Mare al lui Magellan (LMC = Large Magellan Cloud) este cel mai apropiat sistem stelar extragalactic, fiind situat la distanţa de numai 55 kpc. Datorită acestei împrejurări el este accesibil observaţiilor care urmăresc detectarea surselor X.

În acest sistem stelar extragalactic (LMC), prima sursă X a fost detectată încă prin 1969 cu aparatele de la bordul unei rachete. Apoi, cu aparatele de la bordul sateliţilor : „Copernicus", SAS-3, Ariel-5, şi HEAO-1 au fost reperate sursele LMC X-1, X-2, X-3 şi s-a stabilit variabilitatea lor la scala de timp de ordinul unei luni sau chiar mai puţin. Aici au fost identificate vreo 7 surse X pentru care încă nu s-au găsit corespondenţii optici. Printre acestea amintim

LMC X-5 şi X-6, precum şi sursa temporară A 0538-66, unele dintre aceste surse fiind resturi de supernove. Este posibil ca una dintre acestea să coincidă cu restul de supernovă $N_{132}D$.

Observate în domeniul spectral cuprins între 0,5 şi 2 keV, unele surse X din „bara" Norului Mare al lui Magellan s-au dovedit a avea energia de 10^{37} — 10^{38} erg/s. De la sursa LMC X-3 s-au recepţionat radiaţii şi în domeniul 0,15—0,28 keV, iar satelitul „Einstein" a determinat poziţia precisă a acesteia.

În noiembrie 1982, la Observatorul Cerro Tololo s-a iniţiat observarea optică a sursei LMC X-3, la telescopul de 4 m.

Din compararea datelor observaţionale obţinute în domeniul optic şi cel al radiaţiilor X s-a ajuns la concluzia că sursa respectivă este o stea dublă spectroscopică, cu perioada orbitală de 1,7 zile, steaua însoţitoare fiind o stea de pe secvenţa principală, de tipul spectral B3 şi magnitudine aparentă $m = 18$.

Din consideraţiile făcute asupra mişcării orbitale se apreciază că sursa LMC X-3 ar avea o masă de peste 6 mase solare, fapt care ne îndreptăţeşte să presupunem că aici este prezentă o gaură neagră. Se pare că aceasta ar fi prima gaură neagră „detectată" dincolo de limitele Galaxiei noastre.

În *Norul Mic al lui Magellan* (SMC = Small Magelan Cloud) se cunoaşte o singură sursă X de natură stelară. Aceasta are $L_x \approx 1,3 \cdot 10^{38}$ erg/s.

Satelitul „Einstein" a recepţionat trei imagini spectrale ale *Galaxiei din Andromeda* (M 31). Aici au fost identificate peste 70 de surse X „punctuale". Ele sînt situate în ramura exterioară a acestei galaxii spirale şi alcătuiesc un fel de inel în interiorul căruia se mai află hidrogen ionizat şi stele tinere luminoase. Una dintre sursele X din M 31 are formă de stea luminoasă şi se proiectează (sau coincide) peste nucleul galaxiei respective. Menţionăm că luminozitatea X a acestei galaxii este cu ceva mai mare decît luminozitatea corespunzătoare a regiunii centrale a Galaxiei noastre. Trei surse X au fost descoperite în roiurile stelare globulare din interiorul lui M 31, dintre care cel puţin una este variabilă. În general, sursele X din M 31 au luminozitatea de acelaşi ordin de mărime ca şi sursele din Calea Lactee.

În diapazonul X, radiogalaxia Centaurus-A (NGC 4128) a fost observată încă prin anul 1970. În acest scop s-au utilizat receptoarele de la bordul unor rachete și sateliți artificiali; dintre aceste vehicule satelitul „Einstein" a adus informații deosebit de valoroase.

Observațiile arată că deși Centaurus-A este o puternică sursă radio, ea emite o mare cantitate de energie și în domeniul X. S-a pus în evidență prezența unui nucleu compact al acestei galaxii eliptice, nucleul respectiv fiind responsabil de marea parte a emisiei X.

Structura sursei X din nucleul lui Centaurus-A este caracterizată prin două componente: una cu raza de 3′ (= 4,5 kpc) care coincide cu nucleul văzut în radiații infraroșii; cealaltă componentă are raza de 6′ și coincide cu lobii din structura radio. Această a doua componentă are strălucire variabilă, o variație de 25% în strălucire la scala de timp de ordinul zilelor sau chiar al orelor.

În anii 1972—1975, la sursa din Centaurus-A s-a înregistrat o creștere în intensitatea radiației X, iar mai tîrziu s-a observat revenirea spre nivelul normal. Poziția și variația observată a intensității sînt în acord cu ipoteza că nucleul central văzut în infraroșu ar fi sursa de energie emisă în domeniul X. Puterea generală a radiației X este de circa 10^{42} ergi/s.

De asemenea au fost înregistrate erupții în domeniul radio, acestea fiind în bună concordanță cu variațiile în domeniul X, fapt care duce la concluzia că emisia de energie în cele două domenii spectrale este determinată de unul și același mecanism. Unii cercetători susțin că aici ar putea să funcționeze atît procesul sincrotron, cît și efectul Compton invers. Acesta din urmă este bazat pe ciocnirea cuantelor infraroșii cu electronii relativiști responsabili de radiația sincrotron a lui Centaurus-A. În cursul unei ciocniri de acest fel, electronii pierd energii, iar cuantele infraroșii o cîștigă, mărindu-și astfel energia la zeci sau sute de keV, devenind vizibile în domeniul X.

Alți cercetători consideră că în centrul lui Centaurus-A ar exista o gaură neagră, iar radiațiile X ar fi o urmare a acreției de masă pe acest obiect colapsat.

Structura filamentară observată la Centaurus-A sugerează prezența unui jet de materie care a rezultat în urma unei presupuse explozii ce s-ar fi petrecut aici cu mult timp în urmă și care ar fi generat sursa de unde radio. Acest jet se întinde pînă la mai mult de 130 000 ani lumină de la centrul galaxiei respective. Pe la începutul anilor '70, în domeniul optic s-a detectat structura filamentară a jetului pe o regiune cu raza de 0,5° în jurul centrului lui NGC 5128.

În domeniul X jetul a fost evidențiat pe o întindere de cîteva minute de arc în direcția nord-est, dar cele mai luminoase nodozități ajung numai pînă la 15—60 secunde de arc de la nucleu. În mod clar, aceste formațiuni sînt orientate spre unul din cei doi lobi ai structurii radio.

Astăzi se admite că jetul observat în domeniul X, precum și emisia pe unde radio sînt determinate de procesul sincrotron. Radiațiile X sînt generate de către electronii relativiști cu energii de peste 10^{14} eV, aceștia din urmă fiind accelerați de către undele de șoc sau turbulența produsă în însuși fluxul de particule.

Nucleul galaxiei eliptice NGC 5128 (Centaurus-A) este cunoscut a fi sediul unui important eveniment trecător, iar pentru cercetarea acestuia s-au efectuat observații radio și în domeniul X. S-au pus în evidență erupții la scala de timp de ordinul anilor.

Pentru examinarea corelației dintre rezultatele radio și cele din domeniul X, s-au efectuat observații radio pe lungimea de undă λ=13,5 m, iar cele în domeniul X au fost furnizate de Ariel-5.

Ca surse X, *galaxiile Seyfert* prezintă un interes deosebit. Faptul că unele galaxii Seyfert sînt puternice surse X s-a stabilit din datele furnizate de UHURU, care a dat primele rezultate legate de galaxiile NGC 4151 și NGC 1275. Aceste rezultate au fost confirmate prin observațiile efectuate de Ariel-5, SAS-3, „Copernicus" și „Einstein", care au descoperit și alte surse noi legate de această clasă de obiecte.

Între iunie 1983 și aprilie 1984, satelitul EXOSAT a observat galaxia Seyfert NGC 4151 și a remarcat o reducere puternică a fluxului în diapazonul dintre 2 și 10 keV. Această reducere în intensitatea radiațiilor X a fost însoțită de scăderile corespunzătoare și în domeniile infraroșu și ultraviolet.

Din aceste observații s-a mai stabilit și faptul că NGC 4151 conține două regiuni emițătoare de radiații X: o componentă care emite radiații X moi în mod constant, nefiind o sursă variabilă și care ar fi determinată de un mediu fierbinte situat între nori de gaz; o a doua componentă care emite radiații X dure (tari) și este situată undeva în apropierea nucleului.

Galaxia NGC 5548 este una dintre galaxiile Seyfert luminoase, albastră, care are linii puternice de emisie. Observațiile efectuate cu aparatele de la bordul satelitului SAS-3 arată că această galaxie este identică cu sursa X 2A 1415 + 255. Același lucru este confirmat și de Observatorul „Einstein" (HEAO-2).

În cursul lunii aprilie 1978, galaxia Seyfert NGC 6814 (de tipul 1) a fost urmărită cu aparatele de la bordul lui HEAO-1. Datele astfel obținute arată că nucleul activ al acestei galaxii a suferit o modificare a strălucirii cu un factor de 2,5 și s-a evaluat o perioadă de circa 100 secunde. Acest rezultat este important, deoarece el impune o limită superioară pentru dimensiunile sursei respective, limită care este evaluată la numai cîteva minute lumină.

În domeniul X, galaxia NGC 6814 are o luminozitate de circa 10^{43} erg/s, de aproximativ 100 de milioane de ori mai mare decît luminozitatea totală a Soarelui la toate lungimile de undă. Dar faptul că o energie așa de mare este emisă dintr-un volum așa de mic ridică o serie de probleme legate de explicarea mecanismului prin care se produce energia emisă. De aceea, se consideră că prin observațiile în domeniul X se vor obține unele rezultate care să ne apropie de înțelegerea mecanismului de bază prin care se generalizează o cantitate de energie atît de mare. Astfel, dacă se consideră ipoteza prezenței unei găuri negre, se constată că ea ar trebui să aibă o masă de cel puțin 90 000 mase solare.

Încă de la lansarea lui UHURU s-a constatat că multe roiuri de galaxii sînt și surse X cu aspect difuz, rezultat deosebit de important pentru examinarea structurii și evoluției unor astfel de formațiuni.

Pentru cercetarea radiației în domeniul X de la *roiul din Virgo* (Fecioara), s-au efectuat observații cu aparatele de la bordul sateliților: UHURU, OSO-8, Ariel-5 și „Einstein"

În modul acesta s-a constatat că inima acestui roi, galaxia M87, este o sursă puternică de radiații X, aceasta fiind printre primele surse X detectate la depărtări care depășesc dimensiunile Galaxiei noastre. În plus, în acest roi există încă cel puțin patru galaxii, situate în apropierea regiunii centrale, care apar ca surse X. Printre acestea din urmă se află galaxiile eliptice masive M84 și M86. Se pare că există o corelație între luminozitate în domeniul X și masa corespunzătoare.

M87 este o galaxie eliptică gigantă; este de vreo 100—1 000 de ori mai masivă decît Galaxia noastră și are o luminozitate de 10^{42} erg/s. Se pare că aceasta este scufundată într-o baie de radiații X.

Din cercetarea emisiei X a lui M87 și emisia X generală a roiului din Virgo se ajunge la concluzia că emisia X a roiului nu este centrată chiar pe M87, ci are o structură mult mai complicată, dar care se poate delimita în două regiuni: una „rece" ($\sim 10^7$K) în jurul lui M87 și alta „fierbinte" ($\sim 10^8$K) centrată pe centrul roiului, lîngă M84. În plus, o cantitate importantă a acestei radiații provine de la gazul fierbinte care se găsește distribuit printre galaxiile componente. De altfel, s-a constatat că gazul fierbinte intergalactic are aceeași compoziție ca și Soarele, fapt care sugerează concluzia că el nu este o rămășiță a materiei din care s-au format galaxiile, ci a fost produs în cursul istoriei structurilor respective, poate a fost îmbogățit cu metale prin exploziile de supernove.

Gazul fierbinte intergalactic poate să conțină o fracțiune importantă din masa roiului, o cantitate chiar suficientă pentru a se menține stabil din punct de vedere gravitațional. De aceea, se consideră că observațiile în domeniul X ar putea aduce informații cu privire la originea și evoluția roiului ca un întreg.

Observațiile în domeniul X efectuate cu OSO-8 au arătat că în interiorul roiului din Virgo există o componentă termică cu o temperatură de circa $25 \cdot 10^6$ K și o abundență relativă a fierului apropiată de valoarea cosmică.

Pentru domeniul 2 — 20 keV, Ariel-5 stabilește prezența a două regiuni care emit radiații X, una fiind centrată pe M87, iar alta fiind situată ceva mai la nord de M87. În domeniul X, galaxia M87 are un nucleu de 15'.

După cercetarea evoluției dinamice a roiului din Virgo se ajunge la concluzia că aici este vorba de o fază timpurie a tabloului evolutiv. În favoarea acestei afirmații vin : prezența gazului la temperatură joasă, detectarea emisiei din jurul galaxiilor individuale masive și distribuția asimetrică a gazului din interior.

O altă sursă X identificată în roiul din Virgo este galaxia M86, care a fost „detectată" de observatorul „Einstein". Aici a fost semnalată o emisie difuză care ar fi fost generată de gazul fierbinte din interiorul ei. Dar galaxia M86 nu este unică în felul ei ; caracteristici asemănătoare au fost observate și la sursa A 1367. Astfel de situații se mai întîlnesc și la alte galaxii din alte roiuri. Se pare că este vorba de caracteristici comune pentru roiurile care se găsesc la anumite stadii de evoluție.

Roiul de galaxii din Perseus are galaxia centrală (NGC 1 275) ca o puternică sursă de radiații X. Intensitatea radiației acestei galaxii crește pe măsură ce dimensiunile corespunzătoare cresc. Acest rezultat ar putea fi atribuit acreției de gaz din interiorul roiului determinată de galaxia centrală — NGC 1 275.

Datele observaționale furnizate de „Copernicus" arată că aici este vorba de emisia discretă a galaxiei NGC 1275, dar că mai există și o emisie a unei surse extinse care este situată pe linia de unire dintre galaxiile NGC 1275 și IC 310.

Emisia X din roiul din Perseus este simetrică față de partea centrală a roiului, pentru nucleul respectiv fiind apreciată raza de 17 minute de arc.

Roiul de galaxii din Coma Berenices nu are o distribuție preferențială a galaxiilor componente. Aici se observă o distribuție alungită în direcția est-vest, fenomen detectat și prin analiza datelor observaționale din domeniul X. Totuși se constată că centroidul emisiei X este situat în vecinătatea galaxiei supergigante NGC 4874.

Observarea lacertidelor în domeniul X

Obiectele de tipul BL Lacertae s-au dovedit a fi surse intense de radiații X extragalactice. O examinare întreprinsă în primele săptămîni după lansarea observatorului orbital HEAO-1 a arătat că, pe atunci, numai două lacertide au

fost prezente în cîmpul de „vizibilitate". Este vorba de Markarian 501 și IZw 1 727 + 50 care au fost înregistrate ca surse X, prima dintre acestea fiind cunoscută de mai înainte, pe cînd cea de-a doua a fost observată pentru prima dată.

Intensitatea înregistrată a semnalului lui Mark 501 a arătat că aparatele de la bordul lui HEAO—1 au avut o sensibilitate de 10 ori mai mare decît cele cu care a fost dotat UHURU.

În timpul celor 10 zile cît a fost observat, Mark 501 s-a prezentat ca un obiect cu strălucire variabilă, corespondentul optic al acestuia fiind identic cu acela al sursei 4U 1651+39.

Tot cu aparatele de pe HEAO—1 a fost identificată sursa X care corespunde radiosursei PKS 0548-322. Aici notația PKS arată că inițial obiectul respectiv a fost catalogat ca o radiosursă de către cercetătorii de la Parkes — Australia cu coordonatele ecuatoriale : $\alpha = 05^m48^s$ și $\delta = -32°$. Această sursă se găsește în emisfera sudică și are magnitudinea $m = 16$. Este vorba de un obiect cu aspectul unui punct luminos înconjurat de o nebuloasă mai puțin strălucitoare, un fel de halo cu diametrul aparent de 15″, liniile de absorbție indicînd o deplasare spre roșu $z = 0{,}067$.

Ca o sursă de radiații X moi este amintită și radiosursa PKS 2155-304 din constelația Piscis Austrinis, corespondentul optic fiind un obiect cu magnitudinea aparentă $m = 14$ care aparține la clasa lacertidelor.

Datele înregistrate de HEAO-1 au semnalat unele variații foarte rapide în strălucirea lui PKS 2165-304 la scala de timp de ordinul orelor. De aici rezultă că energia emisă de acest obiect provine de la un volum relativ mic, cu un diametru probabil mai mic decît 6 ore lumină, adică comparabil cu distanța de la Soare la ultima planetă cunoscută în sistemul solar — Pluto. Luminozitatea X este $L_x \approx 10^{46}$ erg/s, aceasta fiind de circa 4 ori mai mare decît cea observată la maximul de strălucire a mai multor lacertide, cum este de exemplu, Mrk 421 în starea de erupție.

Din examinarea detaliată a datelor furnizate de HEAO-1, la data de 28 mai 1978, au mai rezultat identificările a altor cîteva lacertide ca surse X (2 A 1219+305 și H 0548-32), unele dintre acestea fiind cercetate și confirmate cu aparatele de la bordul altor observatoare orbitale lansate ulterior.

Printre acestea amintim pe Mrk 421, care a fost confirmată de observațiile efectuate cu aparatele de la bordul lui SAS-3. Cu trei luni mai înainte, această sursă fusese observată de IUE, care constată natura sincrotron a radiației respective.

Studiile întreprinse asupra lui Markarian (Mrk) 421 au arătat că este vorba tot de o galaxie eliptică, corespondentul optic al acesteia fiind identic cu acela al sursei 2A 1101 + 384.

În particular , Mrk 421 are o emisie extrem de variabilă în domeniul X. În domeniul spectral definit de 2 și 10 keV s-a detectat o variație a energiei emise cu un factor de 100 la scala de timp de ordinul anilor și o variație cu un factor de 20 la scala de timp al zilelor. Fluxul de radiații de la 0,2 keV a fost detectat a fi variabil la scala de timp de 0,8 zile.

Observațiile efectuate de observatoarele orbitale arată că Mrk 421 are o regiune compactă care emite radiații X, iar variabilitățile detectate în domeniile optic și X sînt corelate, fapt care vine să susțină ipoteza după care acest obiect emite ca urmare a procesului sincrotron.

Observarea quasarilor în domeniul X

Deoarece quasarul 3C 273 este cel mai luminos din clasa respectivă de obiecte extragalactice, era de așteptat ca acesta să fi fost prima țintă pentru observații în domeniul X. La început a fost urmărit cu ajutorul aparatelor amplasate la bordul unei rachete care a fost lansată în anul 1967. Prezența radiațiilor X a fost confirmată prin intermediul aparatelor de la bordul unei rachete de tip „balon sondă", iar satelitul UHURU a furnizat primele înregistrări sistematice. Astfel, în primul catalog de surse X, întocmit de UHURU, singurul qua sar era sursa 3C 273.

Luminozitatea în domeniul X a quasarului 3C 273 este $L_x \approx 10^{46}$ erg/s, fapt care arată că aici este vorba de o sursă care emite de circa un milion de ori mai multă energie decît cea mai puternică surs de acest fel din Galaxia noastră.

Quasarul 3C 273 a fost observat și cu aparatele de la bordul lui Ariel-5 care, între anii 1975 și 1977, au scos în evidență variabilitatea energiei radiate în domeniul X. Atunci nu s-a observat vreo variație în domeniul optic sau/și radio.

Al doilea quasar observat în domeniul X este obiectul 2A 2 251-179 care, în acest domeniu, a fost înregistrat în anul 1977, în constalația Aquarius (Vărsătorul). Primele radiații X au fost detectate de Ariel-5, iar poziția sa precisă a fost determinată de SAS-3. Are magnitudinea aparentă (optică) $m = 14,1$ și deplasarea spre roșu $z = 0,068$.

Al treilea quasar observat în domeniul X are notația 4U 0241 + 61 ; el se găsește în constelația Cassiopeia la numai 850 milioane ani lumină. Are deplasarea spre roșu $z = 0,044$ și este cel mai apropiat dintre quasarii cunoscuți. Poziția acestuia a fost determinată de SAS-3, dar pe locul indicat de UHURU.

În domeniul optic quasarul 4U 0241 + 61 apare de magnitudinea $m = 16,4$ și este puternic afectat de absorbția luminii prin mediul interstelar din Galaxie, el fiind situat la latitudinea galactică de numai 2,4°. La această latitudine galactică, praful interstelar reduce strălucirea obiectului cu circa 4,6 magnitudini. Din acest motiv, magnitudinea aparentă vizuală, corectată de extincție, ar fi $m_v = 11,8$, fapt care ar duce la $M_v = -25,3$.

Dacă acest quasar s-ar proiecta pe bolta cerească undeva la o latitudine galactică mai mare, absorbția luminii prin Galaxie ar fi fost mult mai mică. În astfel de condiții, quasarul ar fi fost mult mai strălucitor și, foarte probabil, el ar fi fost descoperit de astronomia optică prin anul 1940 . Prin urmare, quasarii puteau fi descoperiți cu mult timp mai înainte de a-i fi descoperit radioastronomia. În aceste condiții istoria astronomiei ar fi fost puțin diferită, dacă acest quasar „nonconformist" nu s-ar fi găsit atît de aproape de planul galactic.

Pe de altă parte, dacă quasarii n-ar fi fost descoperiți în anul 1963 prin observații radio, cu siguranță că i-ar fi descoperit mai tîrziu astronomia X care, în ultimul timp, determină pozițiile obiectelor cu mare precizie.

Faptul că cei mai apropiați quasari sînt surse X sugerează presupunerea că și alți quasari, mult mai îndepărtați, pot emite astfel de radiații, dar depărtarea lor mare îngreunează recepționarea energiei emise în acest domeniu spectral. De aceea, aparatura de la bordul următorilor sateliți a fost prevăzută cu o sensibilitate mărită. Astfel, de exemplu, cu

„Einstein" (HEAO-2), între 13 noiembrie 1978 și 1 iunie 1979, au fost observați 35 quasari. Datele observaționale au arătat că există o corelație între energiile emise în raze X și în domeniul optic, fapt care susține ipoteza că quasarii au o contribuție esențială la fondul de radiație X. De asemenea, se speră că observațiile în domeniul X vor contribui la lămurirea naturii deplasărilor spre roșu.

La data de 23 ianuarie 1980, timp de 1 600 secunde, cu aparatele de la bordul satelitului „Einstein" a fost observat quasarul 1525 + 227. Pe cale statistică s-a determinat perioada de variație a strălucirii, $P=200$ secunde, fapt care sugerează, pentru acest obiect, un diametru mai mic decît o unitate astronomică.

Cu același satelit, la 6 martie 1981, același quasar 1 525 + 227 a fost observat timp de 12 000 secunde, dar nu s-a putut determina nici o periodicitate. Iată de ce este foarte greu de tras concluzii sigure asupra procesului prin care se realizează energia emisă de aceste corpuri enigmatice.

Capitolul 6

DETECTAREA ENERGIILOR ÎNALTE. ASTRONOMIA GAMA

Încă din activitatea experimentală legată de dezintegrarea radioactivă, precum și din anumite considerații teoretice legate de transformările termonucleare din interiorul stelar, s-a ajuns la concluzia că radiațiile gama trebuie să joace un rol important în problemele de astrofizică. Cu toate acestea, abia prin anii '50 apar unele speculații teoretice legate de interacțiunea dintre particulele energetice și materia celor mai diferite obiecte sau radiațiile acestora din urmă. Așadar, se ajunge la concluzia că interacțiunea dintre particulele cu mare energie și mediul interstelar ar trebui să producă fotoni cu o energie de peste 50 keV. Se întrevedea, astfel, posibilitatea că radiațiile gama ar putea aduce informații deosebit de valoroase cu privire la procesele fizice care se derulează în cele mai diferite obiecte cosmice : Soare, stele, sisteme stelare, mediul interstelar și intergalactic, cîmpurile magnetice interstelare și intergalactice, precum și concentrarea posibilă a antimateriei în Univers.

Interesîndu-se de radiațiile gama, astronomii lărgesc considerabil domeniul cercetărilor observaționale, în acest mod putînd fi acumulate date noi despre „Universul invizibil". Pe această cale se întrevedea o legătură posibilă între anumite procese fizice, legătură care să fie pusă în evidență prin compararea datelor observaționale obținute în diferite domenii spectrale.

După cum se știe, radiațiile gama reprezintă cea mai energetică componentă a spectrului electromagnetic, energia acestora fiind de peste o sută de mii de electronvolți. Ca și radiațiile X, radiațiile gama se pot detecta numai cu receptoare lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre, lansări efectuate prin intermediul unor baloane, rachete sau sateliți artificiali ai Pămîntului.

Spre deosebire de receptoarele corespunzătoare altor domenii spectrale, detectoarele penru radiațiile gama sînt mult mai masive. De aceea, direcția din care vine radiația respectivă se determină cu precizie mai mică, iată motivul pentru care primele lansări, ale unor astfel de receptoare au fost amînate de mai multe ori. Abia în anul 1967, receptoare pentru radiații gama au fost lansate prin intermediul satelitului *Helios-2*. În acel an s-a înregistrat prima variație a luminozității gama, care era în mod vădit mai mare decît nivelul fondului obișnuit.

În anul 1968, NASA lansează satelitul „OSO-3" (Orbital Solar Observatory), la bordul căruia au fost amplasate receptoare pentru radiații gama. În acest mod, pentru prima dată au fost înregistrate radiații cu energii de peste 50 MeV. Dar, pe atunci, atît mecanismul de producere a unor astfel de radiații, cît și obiectele care le emiteau rămîneau necunoscute.

Totuși, rezultatele obținute de OSO-3 au scos în evidență prezența unor variații bruște în intensitățile înregistrate, fapt care a trezit un interes deosebit pentru cercetările astronomice din acest domeniu spectral. S-a confirmat rezultatul teoretic cu privire la faptul că fotonii gama sînt produși prin interacțiunea razelor cosmice și mediul interstelar.

Cercetările din domeniul astronomiei gama au fost intensificate la începutul anilor '70 cînd, cu sprijinul unor agenții spațiale, au fost lansate, în spațiul circumterestru, detectoare de radiații gama.

La 26 iunie 1971, la bordul unui balon, cu ajutorul unor receptoare, au fost înregistrate radiații gama de la pulsarul din Nebuloasa Crab (NP 0532), punîndu-se în evidență radiații cu energii de ordinul a 100 MeV.

La 6 octombrie 1971, detectoarele de raze gama de la bordul altui balon, timp de 3,5 ore, au urmărit Nebuloasa Crab și au înregistrat pulsurile de la pulsarul situat aici. Cu această ocazie s-a constatat că radiațiile gama ale acestui pulsar erau caracterizate prin aceeași perioadă ca și pulsurile recepționate în alte domenii spectrale ($P=0,033$ s). Aceste observații au fost efectuate în domeniile energetice 240—800 MeV și peste 800 MeV.

6.1. Radiația gama de origine solară

La 29 septembrie 1971 a fost lansat observatorul solar orbital OSO-7, care era destinat pentru cercetări solare în domeniul radiațiilor gama. Cu ajutorul receptoarelor de la bordul acestui satelit, între 4 și 7 august 1972, s-au înregistrat primele radiații gama de la anumite erupții solare. S-au înregistrat linii de emisie în domeniile definite prin energiile de 0,5 și 2,2 MeV, iar considerațiile teoretice au arătat că în cursul acestor erupții, prin intermediul reacțiilor termonucleare, au apărut izotopi cu durata de existență scurtă, ai carbonului, nitrogenului și oxigenului. Aceștia s-au dezintegrat pînă la stările stabile, fenomenul fiind însoțit de emisia de pozitroni.

La lungimile de undă corespunzătoare nivelului energetic de 2,22 MeV a fost identificată linia deuteriului (hidrogenul greu), această radiație fiind determinată de dezexcitarea unui nucleu excitat de deuteriu și trecerea lui într-o stare inferioară prin emisie de radiații gama.

După cum se știe, noi sîntem obișnuiți cu reacțiile termonucleare atunci cînd este vorba de interiorul adînc al Soarelui, unde tempertura mare întreține desfășurarea lor. De aceea, reacțiile nucleare observate în erupțiile solare, probabil, trebuie să fie considerate ca fiind de un alt tip — *reacții nucleare nontermice*. Ele trebuie să fie asemănătoare cu efectele observate într-un accelerator de particule. Se pare că în erupțiile solare există fluxuri de protoni destul de rapizi care să producă radiații gama, efectele acestora fiind detectate și prin observații efectuate în cadrul radioastronomiei

Protonii, accelerați în timpul unei erupții solare, interacționează cu nucleele de C, N, și O pe care le întîlnesc în atmosfera solară. În timpul interacțiunilor, protonii sînt difuzați neelastic. Ei lasă o parte din energia lor cinetică la „nucleul țintă" care devine excitat. Apoi, nucleele excitate se dezexcită prin emisia de fotoni gama. Neutronii sînt parțial captați de protoni pentru a produce deuteriu și fotoni cu energia de 2,23 MeV. Linia de emisie care corespunde la această energie a fost înregistrată în timpul erupțiilor solare, iar intensitatea lor este proporțională cu fluxul de neutroni în erupție.

În coroană, la 1,5 raze solare de la fotosferă s-a înregistrat temperatura de trei-patru milioane (grade) Kelvin în regiunile active şi de numai 1 700 000 K în regiunile liniştite şi în vecinătatea polilor. Ocazional, mai ales cu OSO-7 s-au găsit temperaturi apropiate de numai 1 000 000 K, regiunile respective fiind numite *găuri coronale*, acestea reprezentînd nişte stări fundamentale în coroana solară. Curenţi coronali puternici au fost puşi în evidenţă sub formă de arce sau noduri în coroana internă, rareori şi în coroana externă.

Evenimentele din atmosfera inferioară a Soarelui pot afecta curenţii coronali. La 2 august 1972, în coroană, aparatele de la bordul lui OSO-7 au detectat curenţi strălucitori însoţiţi de ejecţia unei plasme fierbinţi, unii dintre aceştia avînd viteze cuprinse între 250 şi 400 km/s.

6.2. Surse de radiaţii gama galactice

Am arătat mai sus că OSO-7 era un observator orbital destinat cercetărilor solare, de aceea primul satelit artificial al Pămîntului destinat astronomiei gama este considerat a fi SAS-2 (Small Astronomical Satellite), care a activat în cursul a şapte luni din anii 1972 şi 1973, activitatea lui fiind însă întreruptă din cauza unor defecţiuni tehnice. Totuşi, datele furnizate de acesta au îmbogăţit mult cunoştinţele noastre despre pulsarul din Nebuloasa Crab, PSR 0532+21, şi s-au recepţionat radiaţii gama de la pulsarul din constelaţia Vela, PSR 0833-45, precum şi de la o sursă încă neidentificată în domeniul optic; este vorba de o sursă de radiaţii gama situată în constelaţia Gemini. Această sursă a primit denumirea de *Geminga*, şi este a doua dintre cele mai puternice surse de radiaţii gama de pe bolta cerească, după pulsarul din Nebuloasa Crab.

Deşi Geminga este format din cuvîntul Gemini şi Gama adică este vorba de o sursă de raze gama din constelaţia Gemini, acest cuvînt are şi un înţeles ascuns. Unii dintre cercetătorii aceştia sînt de origine din Milano, iar în dialectul milanez Geminga indică locul în care nu se află nimic. Ulterior, la poziţia obiectului Geminga, s-a identificat o sursă X; în domeniul optic ar fi vorba de o stea albastră de magnitudinea 23, pe cînd în domeniul radio nu se simte nici o emisie.

Atenţia asupra lui Geminga a fost atrasă în mod deosebit după data de 12 octombrie 1983, cînd patru astronomi europeni (P. Delache, J. Paul, G. B'gnami, şi G. Isaak) au sugerat faptul că aceasta ar fi o sursă de unde gravitaţionale, care sînt corelate cu un fel de pulsaţie a Soarelui.

După cum se ştie, Soarele întotdeauna a servit ca etalon pentru multe rezultate astronomice, de aceea a fost surprinzător faptul că s-a pus problema variabilităţii radiaţiei solare cu perioada de 160 minute.

Pe baza observaţiilor în domeniul X obţinute între 1979 şi 1983, în special cu satelitul european EXOSAT, s-a constatat că Geminga ar fi o sursă variabilă cu perioada foarte apropiată de un minut. De altfel, în 1977 se mai obţinuse o perioadă de 59 secunde în radiaţii gama, infirmată ulterior din cauza unei valori limită utilizate.

Nici unul din modelele teoretice nu explică, în mod satisfăcător, particularităţile observate ale obiectului Geminga.

Sistemele de stele duble strînse, care sînt surse X, ar putea să emită şi radiaţii gama ; este o presupunere care a fost confirmată experimental. Într-adevăr, în anul 1973, cu satelitul SAS-2 au fost recepţionate radiaţii gama cu energii de ordinul unui teraelectronvolt (TeV $=10^{15}$eV), care veneau de la sursa X cunoscută sub notaţia Cygnus X-3. Observaţiile au evidenţiat prezenţa unei perioade de variaţie a strălucirii de 4,8 ore. Dar în loc de o sinusoidă, în domeniul gama, curba de lumină prezintă două pulsuri înguste care în mod nemijlocit se produc înainte şi după minimul strălucirii din domeniul X.

Stabilitatea perioadei de 4,8 ore confirmă faptul cunoscut că această sursă este o stea dublă alcătuită dintr-o stea neutronică şi una normală. Trebuie semnalată aici şi lipsa de variaţie a luminii în infraroşu şi de a sublinia enigma pe care o ridică o astfel de observaţie.

Prin urmare, se ridică întrebarea „De ce, în domeniul gama, sursa Cygnus X-3 emite mai multă energie decît în alte domenii spectrale ?". Pentru a răspunde la o astfel de întrebare, cît şi la alte întrebări de acest fel, este util să amintim aici faptul că radiaţiile gama de origine cosmică au un nivel energetic foarte ridicat şi anume de un milion de ori mai intense decît cele care se pot realiza în reactoarele nucleare terestre. De aceea, la impactul cu păturile înalte ale atmosferei

terestre, din atomii acesteia ele smulg electroni, determinînd astfel adevărate „avalanșe" de electroni cu mari energii și care pot pătrunde pînă la receptoarele de la sol, cu mai multă ușurință decît radiațiile X. În astfel de condiții, atmosfera terestră joacă un rol de amplificator pentru fotonii de mari energii, iar receptoarele de la sol pot înregistra radiații gama cu energii de peste 10^{12} eV.

Avalanșele de felul celor amintite mai sus sînt intensificate în straturile atmosferice de la altitudini mici, electronii respectivi putînd să fie puși în evidență prin așa-numitul efect Cerenkov.

O sursă galactică discretă de raze gama, la latitudine galactică medie, a fost identificată în norul dens ρ Ophiuchi care, așa cum am mai amintit, este o puternică sursă de radiații infraroșii, depărtarea acestuia de noi fiind de numai 500 ani lumină.

•

Încă cu mult timp înainte de a se fi recepționat datele observaționale în domeniul radiațiilor gama, se considera că în centrul Galaxiei noastre trebuie să se deruleze procese fizice legate de energiile mari. S-a ajuns astfel la concluzia că în direcția centrului galactic trebuie să se găsească o linie spectrală situată la lungimea de undă $\lambda = 2{,}4 \cdot 10^{-10}$ cm, căreia îi corespund fotonii cu energia de 511 keV. Această linie trebuie să fie un rezultat determinat de anihilarea dintre un pozitron și un electron care, în conformitate cu relația

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow 2\gamma$$

dau naștere la două cuante gama.

În galaxia noastră există multe procese fizice prin intermediul cărora se produc pozitroni, electronii existînd din abundență. Prin urmare, prezența liniei de 511 keV era bănuită cu un înalt grad de probabilitate, fapt care a determinat căutarea ei cu multă răbdare. De aceea, în anii 1971 – 1974 s-au depus eforturi susținute pentru căutarea acestei linii, dar nu s-au obținut rezultate pozitive. Abia în anul 1977, această radiație a fost detectată prin intermediul unui telescop, sensibil la radiații gama, amplasat pe un balon, detectorul respectiv fiind răcit cu nitrogen lichid. Fluxul astfel măsurat

a fost de $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ fotoni/cm^2·s. Unii autori sînt de părere că anihilarea dintre un pozitron și un electron poate avea loc într-o regiune de hidrogen ionizat din centrul Galaxiei, într-o componentă de materie ionizată, fierbinte, a mediului interstelar sau în anumite resturi de supernove.

Tot la începutul anilor '70, departamentul de război al Statelor Unite ale Americii a finanțat lansarea sateliților artificiali din seria „Vela" care erau dotați cu detectoare pentru radiații X și gama. Acești sateliți aveau sarcina de a supraveghea experimentele nucleare interzise prin tratate internaționale. Printr-un sistem de triangulație, ei trebuiau să determine pozițiile precise ale unor puncte de pe suprafața Pămîntului.

Unele semnale gama recepționate de sateliții „Vela" aveau energiile cuprinse între 0,1 — 1 MeV, de la început fiind vorba de niște radiații de natură extraterestră și chiar extrasolară. În plus, radiațiile respective erau caracterizate prin impulsuri ale căror durate erau cuprinse între 1 și 50 secunde, aceste impulsuri avînd intensitatea variabilă, cu maxime ascuțite. Este vorba de anumite erupții în luminozitate, erupții pentru care se utilizează noțiunea de „*țîșnitură*" sau „izbucnire", deoarece au amplitudini mai mici și cu durate mai scurte decît erupțiile sau exploziile detectate în alte domenii spectrale.

În revistele cu caracter de cercetare astronomică, rezultatele furnizate de sateliții „Vela" au fost publicate abia la sfîrșitul anului 1973. Aceste rezultate arătau că era vorba de niște „erupții" de radiații gama ale unor obiecte astrofizice cu totul neobișnuite, proprietățile fizice și natura lor rămînînd, încă pentru mult timp, necunoscute.

După cum se știe, sistemul solar este capabil să piardă anumite corpuri mărunte cum ar fi, de exemplu, asteroizii sau resturi din anumite comete dezintegrate. Este vorba de așa-numiții „vagabonzi" interstelari. De existența unor astfel de „vagabonzi" vinovate sînt planetele mari care pot influența orbitele corespunzătoare.

Circulînd prin spațiul interstelar, „vagabonzii" respectivi ar putea întîlni anumite stele neutronice, iar din impactul respectiv ar rezulta o emisie puternică de energie pe lungimile de undă ale radiațiilor gama. Astfel de corpuri rătăcitoare

ar putea proveni și din interiorul altor sisteme planetare din Univers, fapt pentru care întîlnirile cu stelele neutronice pot fi considerate destul de frecvente.

În momentul cînd un „vagabond“ interstelar se lovește de o stea neutronică cu un cîmp magnetic de circa 10^{12} Gs, el pătrunde în steaua neutronică pînă la adîncimea de vreo 20 m și se transformă în plasmă fierbinte. Există cercetări care susțin că această plasmă este observată în timpul acestor „țîșnituri“ de raze gama.

Observațiile de pînă acum arată că toate obiectele cu surse de „țîșnituri“ gama sînt situate în interiorul Galaxiei noastre. Față de Soare acestea se pot găsi, totuși, la depărtări mari, de ordinul cîtorva sute de parseci.

Pentru o cercetare aprofundată a „țîșniturilor“ de raze gama, cercetătorii au utilizat datele observaționale obținute cu aparate lansate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre. În acest scop s-a făcut uz de stații de observații amplasate la bordul navelor americane USAF 78-1 și PVO (Pioneer-Venus Observatory), care au furnizat date pentru următoarele surse: GB 790307, GB 790325, GB 790504, și GB 790731. Aici GB înseamnă erupție gama (gamma burster), pe cînd primele două cifre reprezintă anul din secolul nostru iar celelalte cifre arată luna și ziua în care s-a produs evenimentul respectic: GB 790307 = erupția (țîșnitura) de raze gama din anul (19)79, luna martie, ziua 7. Analiza rezultatelor obținute a dus la următoarele concluzii:

— o dată cu „țîșniturile“ de radiații gama se observă și variația intensității radiațiilor X;

— între evenimentele gama și cele din domeniul X există o diferență de fază; variațiile gama se produc ceva mai tîrziu decît cele din domeniul X;

— se pare că bursterii de radiații X nu sînt independenți de activitatea gama.

Erupția sursei G 811016 (16 octombrie 1981) a fost urmărită, concomitent cu aparatele de pe nava PVO și de la bordul satelitului japonez HAKUCHO. Rezultatele astfel obținute au acoperit domeniul spectral pînă la 2 MeV. Și de data aceasta s-a stabilit faptul că erupțiile slăbesc în domeniile energiilor înalte.

Deoarece un detector de radiații gama determină cu prea mică precizie direcția din care vin semnalele respective, pentru localizarea precisă a unor astfel de surse se efectuează observații simultane de pe mai multe nave cosmice lansate în spațiu la distanțe mari una în raport cu alta. Se realizează astfel o *triangulație*, asemănătoare cu aceea a sateliților „Vela“.

În primii ani de observație se puteau înregistra doar cele mai luminoase surse de radiații gama cu erupțiile cele mai frecvente. Totuși, în 1974 se dispunea deja de un catalog cu 23 evenimente gama detectate prin intermediul detectoarelor sensibile la astfel de radiații, rezultatele respective fiind confirmate și prin aparatele de la bordul unor sateliți lansați special pentru astfel de probleme. În anul 1976, un astfel de catalog menționa 50 de evenimente înregistrate în domeniul gama, rezultatele respective contribuind la îmbogățirea cunoștințelor noastre despre fenomenele astronomice din acest domeniu spectral.

În august 1975 a fost lansat satelitul COS-B, care aparținea agenției spațiale europene ESA (European Space Agency) și era destinat în întregime cercetărilor din domeniul radiațiilor gama. El a funcționat în decursul a 7 ani, timp în care a colectat o serie de rezultate importante.

Între 20 octombrie și 27 noiembrie 1975, satelitul COS-B a urmărit pulsarul din constelația Vela. Datele astfel obținute arată că spectrul energiei pulsante și cel al energiei totale a sursei de raze gama ar putea fi reprezentate printr-o funcție putere. Extrapolarea spre domeniul X duce la valori cu un factor de cel puțin 4 deasupra limitei superioare a fluxului pulsant în jurul lungimii de undă căreia îi corespunde energia de 30 keV. De aceea, fiind necesar un salt pentru potrivirea celor două spectre ale emisiei în radiațiile gama și X, trebuie să admitem că există cel puțin două mecanisme care determină emisia de energie corespunzătoare, în cele două domenii spectrale.

La nivelul de sensibilitate al lui COS-B (70 milioane—5 miliarde eV), pe bolta cerească se găseau multe obiecte observabile, deși numai cîteva au fost detectate, printre acestea găsindu-se și quasarul 3C 273. Harta Galaxiei, stabilită cu observațiile efectuate de COS-B, este prezentată în figura 6.1. Aici, printre stele, este prezentată o bandă de radiații

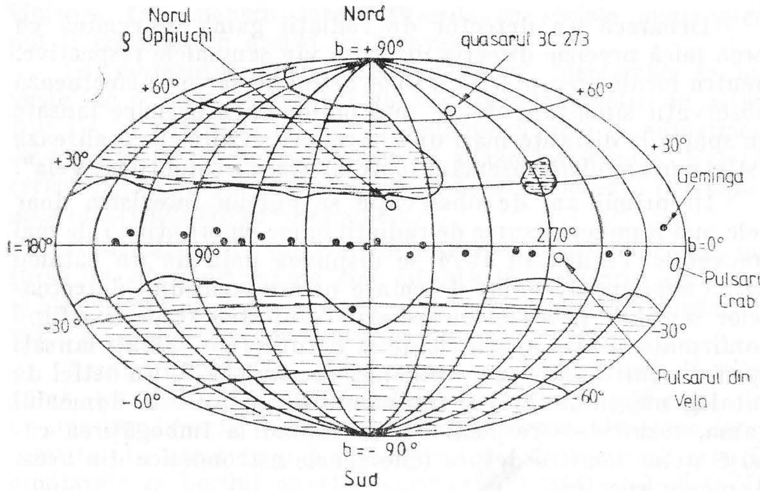


Fig. 6.1. Harta cerului în coordonate galactice : l = longitudinea, b = latitudinea. Sînt reprezentate pozițiile surselor de radiații gama, zonele umbrite (hașurate) corespund regiunilor necercetate. Cerculețele indică surse gama pentru care s-au identificat obiecte observabile și în alte domenii spectrale.

de circa 10° în lărgime ; ea se întinde de-a lungul Căii Lactee. O componentă mult mai îngustă, de numai cîteva grade, apare spre interiorul Galaxiei, între longitudinile 270° și 90°.

În ipoteza că radiațiile gama provin de la interacțiunea razelor cosmice cu mediul interstelar, cele două componente de radiație gama amintite mai sus trebuie considerate a fi legate de gazul care se extinde pînă la cîteva sute de ani lumină deasupra și dedesubtul planului galactic.

Caracteristici importante se obțin și pentru brațele spirale ale Galaxiei.

Materia interstelară „locală" (din apropierea Soarelui — brațul din Perseus) produce radiații gama care se pot observa la latitudini galactice medii. Observațiile efectuate de satelitul SAS-2 pentru prima dată au sugerat că o formațiune din brațul Perseus, cunoscută sub denumirea de Centura lui Gould, contribuie la această emisie. În datele înregistrate de COS-B, această caracteristică „locală" arată o intensificare

a razelor gama de la Orion, Ophiuchus și posibil Taurus. Aceasta corespunde asociațiilor de nori interstelari care se găsesc în regiunile respective.

Rezultatele obținute de COS-B2 confirmă existența unui exces de raze gama în interiorul Galaxiei, mai mare decît acele așteptate de la ciocnirile razelor cosmice uniform distribuite cu hidrogenul atomic neutru în discul Căii Lactee.

Cu ajutorul aparatelor de la bordul unor baloane și sateliți artificiali s-au obținut raze gama din direcția centrului Galaxiei. A fost detectată o sursă cu luminozitatea de $4 \cdot 10^{37}$ erg/s, această sursă putînd fi asociată cu o sursă X, fapt care vine în favoarea ipotezei prezenței mecanismului sincrotron.

Între 18 august și 16 septembrie și apoi între 29 septembrie și 1 noiembrie 1976, satelitul COS-B a urmărit pulsarul din Nebuloasa Crab. Structura pulsului acestei surse constă dintr-un puls mediu și cîteva pulsuri secundare, separate între ele prin circa 13 milisecunde, și se pare că structuri asemănătoare se detectează și la alte lungimi de undă.

Satelitul SAS-2 a detectat, la Pulsarul Crab, energie emisă pe lungimi de undă pînă la aceea care corespunde energiei de 400 MeV. Se constată o potrivire bună între aceste rezultate și cele obținute în domeniul X, fapt care ar putea fi exploatat în favoarea ipotezei care presupune existența unui singur mecanism pentru energia emisă în aceste două domenii spectrale.

Între noiembrie 1981 și februarie 1982, aparatele de la bordul lui COS-B au urmărit sursa Cygnus X-3 cu scopul de a stabili unele periodicități la scala de timp cuprinsă între 1 și 60 zile. Nu s-au obținut rezultate pozitive.

Sursa Cygnus X-3 a fost urmărită în domeniul gama și la Observatorul astrofizic din Crimeea, unde s-a stabilit caracterul periodic al variației respective. S-a evaluat perioada $P = 0{,}199682$ zile. Au mai fost detectate și variații sporadice, în intervale izolate de timp.

Numeroasele cercetări efectuate de COS-B și rezultatele furnizate de acesta au făcut posibilă întocmirea unui catalog unde un obiect este notat prin literele C și G (catalog de surse gama) urmate de cîte două grupe de cifre care marchează longitudinea și latitudinea în sistemul de coordonate galactice.

Astfel, de exemplu, Geminga are notaţia CG 195 + 4 (longitudinea galactică l = 195° şi latitudinea galactică b = +4°).

În catalogul întocmit de COS-B pentru sursele de radiaţii gama de înaltă energie există peste 30 de obiecte, dintre care cel puţin unul este extragalactic. La epoca respectivă numai 4 surse galactice au fost identificate cu obiecte cunoscute şi în alte domenii spectrale; este vorba de pulsarii radio: PSR 1822-09, PSR 0532 + 21, PSR 0740 + 28 şi PSR 0833–45. Toţi aceşti patru pulsari indică faptul că emisia de raze gama constituie un prim proces de activitate în mecanismul general al unui pulsar.

Examinarea comparativă a rezultatelor obţinute de COS-B şi UHURU a scos în evidenţă faptul că cel puţin o sursă de radiaţii gama (CG 135 + 1) este şi o sursă de radiaţii X, această concluzie rezultînd din poziţiile precis determinate.

Printre resturile de supernove care sînt şi surse de radiaţii gama trebuie inclus şi obiectul CG 195 + 4. Acesta a fost descoperit cu aparatele de la bordul satelitului SAS-3. La maximul de strălucire, această sursă are magnitudinea aparentă m = – 3 şi se presupune că ar reprezenta restul unei supernove. Obiectul CG 195 + 4 sau SG 195 + 4 (Sursa Gama) a fost observat în domeniile radio şi X, radiaţia radio avînd un înalt grad de polarizare.

Problema existenţei surselor de radiaţii gama la obiectele care sînt surse X este foarte greu de abordat, mai ales dacă ne gîndim şi la faptul că sursele galactice de radiaţii X sînt legate de stele masive de tipuri spectrale timpurii sau stele ultraviolete mai puţin masive, dar care sînt componente ale unor sisteme de stele duble strînse.

Avînd în vedere problemele interesante şi dificile pe care le ridică astronomia în radiaţii gama, tehnica spaţială i-a acordat din ce în ce mai mare atenţie. Se lansează tot mai multe nave cosmice cu receptoare potrivite pentru radiaţiile gama. Printre acestea amintim navele automate sovietice „Venera 11" şi „Venera 12", satelitul Prognoz 7 (lansate în septembrie şi noiembrie 1978), Cosmos 416, OSO-6, OSO-7, Helios 2, Meteor, HEAO-1 etc.

Pe la mijlocul anilor '70 se dispunea de o tehnică potrivită pentru cercetarea erupţiilor de energie în domeniul radiaţiilor gama: colimatoare cu modulaţie rotitoare, colimator cu

deschidere codificată sau periodică, sisteme de detectoare cu sensibilitate unghiulară anizotropă etc. Au fost elaborate noi metode pentru determinarea direcţiilor în care se găsesc sursele respective. Cu toate acestea, în majoritatea cazurilor aparatura de cercetare era bazată pe detectoare simple care recepţionau radiaţiile gama venite din toate direcţiile.

Încă prin anii 1971 şi 1972, pe satelitul Cosmos-461 a funcţionat un spectrometru pentru radiaţii gama (în diapazonul 30 keV – 4,1 MeV), cu detectoare sensibile pentru toate direcţiile. Aparatele de la bordul acestui satelit au funcţionat 934 ore şi au înregistrat 7 erupţii de radiaţii gama care erau de origine solară, erupţia de la 17 ianuarie 1972 şi încă cinci evenimente asemănătoare, dar ale căror direcţii n-au fost stabilite destul de precis deoarece ele nu au fost observate şi prin intermediul aparatelor de la bordul altor sateliţi.

Pe satelitul *Meteor* s-au aflat detectoare sensibile la energiile emise pe lungimile de undă dintre 50 şi 300 keV. Acest satelit a fost lansat la 29 iunie 1977, pe o orbită sincronă cu Soarele, la înălţime de 65 km, pentru a putea funcţiona fără restricţii – fără timp mort. La bordul acestui satelit a funcţionat un spectrometru sensibil la următoarele domenii energetice: 22 – 50 keV, 50–150 keV şi 150–650 keV. În aceste condiţii au fost urmărite erupţiile de radiaţii gama în cursul a 308 ore, timp în care s-a înregistrat şi o erupţie extrasolară. Au mai fost detectate încă două erupţii, dar înregistrarea lor a fost prea puţin precisă. A fost înregistrată o erupţie la 12 noiembrie 1977, eveniment confirmat şi de aparatele de la bordul satelitului HEAO-1.

Ca un rezultat al colaborării dintre SUA şi RFG, la 15 ianuarie 1976, a fost lansat observatorul solar orbital Helios-2, pe o orbită cu periheliul la 0,29 u.a, pe cînd afeliul ajunge pînă la 1,0 u.a (1 u.a. — o unitate astronomică). Cu aparatele de la bordul acestui satelit au fost detectate 18 erupţii de energie în domeniul radiaţiilor gama, dintre care 5 au fost înregistrate şi de sateliţii Vela-5 şi Vela-6, în cursul anilor 1976 şi 1977. Aceste erupţii au avut loc la datele: 20.03.1976, 7.04.1976, 19.04.1976, 10.03.1977 şi 8.07.1977. Evenimentul de la 20.03.1976 a fost reperat şi prin intermediul aparatelor de la bordul satelitului SAS-3, destinat cercetărilor din domeniul X. De aici s-au desprins următoarele concluzii importante:

— sursele detectate nu sînt distrbuite cu preferință la latitudini galactice mici ;

— verificarea direcțiilor în care se găsesc surse X și gama arată că între cele două feluri de surse nu există vreo legătură.

Prin urmare, „bursterii" de radiații gama apar ca o grupă de surse independente și nu sînt corelate cu sursele X.

Rezultate importante a furnizat și „experimentul" Conus (КОНУС), ale cărui detectoare de radiații gama au fost amplasate la bordul navelor automate „Venera-11" și „Venera-12". Prin intermediul acestora, între septembrie 1978 și februarie 1980, în cursul a 385 zile de funcționare, au fost înregistrate 500 de erupții gama de origine solară și alte 143 erupții extrasolare.

Erupția de radiații gama de la 5 martie 1979

Detectată de către o navă militară, erupția în radiații gama de la 5 martie 1979 a fost urmărită de mai multe nave cosmice care, la data respectivă, se proiectau pe bolta cerească. Printre acestea amintim: navele sovietice „Venera-11" și „Venera-12", satelitul sovietic Prognoz-7, trei sateliți ameri- de tipul „Vela", Helios-2, nava Pioneer Venus și cel de al treilea explorer internațional ISEE-3 (International Sun-Earth Explorer).

Fotonii emiși în cursul acestei erupții avea energiile cuprinse între 50 000 și un milion electronvolți, sursa respectivă fiind situată undeva în direcția constelației Pisces Austrinus (Peștele Austral). Evenimentul era asemănător cu alte erupții detectate cu un deceniu în urmă de către sistemul de sateliți americani „Vela", dar avea o intensitate de vreo sută de ori mai mare. Erupția propriu-zisă a fost urmată de un șir de impulsuri, separate între ele prin intervalul de timp de 8 secunde. Au fost înregistrate peste 100 astfel de impulsuri, dar pînă acum nu s-a identificat obiectul corespunzător în domeniul optic.

Erupția de la 5 martie 1979 a fost de scurtă durată. Într-un timp mai scurt de 0,01 secunde intensitatea radiației, în domeniul dintre 0,1 și 1,5 MeV, a devenit de vreo 400 de ori mai mare decît zgomotul de fond. Aici a fost detectată linia spectrală de emisie de la 430 keV care, foarte probabil, este

linia de la 511 keV cu o mică deplasare spre roșu. Unii astronomi sînt de părere că dintr-o astfel de deplasare s-ar putea stabili natura fenomenului, pe cînd alții sînt de părere că la 5 martie 1979 s-a observat manifestarea unui fenomen nou, de natură necunoscută.

Erupția de la 5 martie 1979 s-a caracterizat printr-o creștere rapidă (0,0002 secunde) și foarte abruptă pînă la maximul ascuțit, urmînd apoi o descreștere care era și ea destul de rapidă. Izbucniri asemănătoare, din aceeași direcție, au mai fost înregistrate după intervalele de timp de 0,6, 29 și 50 zile de la erupția principală.

Analiza datelor observaționale a dus la presupunerea că radiația gama înregistrată la 5 martie 1979, ar fi provenit de la sursa de unde radio N_{49} situată în Norul Mare al lui Magellan. Este vorba de o direcție determinată cu eroarea de ordinul unui minut de arc, precizia mare fiind asigurată de existența celor 9 nave care au contribuit la adunarea datelor observaționale.

Nebuloasa N_{49} este un rest de supernovă care ar fi explodat cu 10 000 ani în urmă. Dar dacă sursa de raze gama este legată de acest rest de supernovă și s-ar găsi la depărtarea de 55 kpc (180 000 ani lumină) admisă pentru Norul Mare al lui Magellan, atunci, în timpul erupției, obiectul respectiv ar fi avut o luminozitate asemănătoare cu aceea a quasarilor, energia emisă ar fi fost de circa $3{,}5 . 10^{43}$ ergi. Iată de ce o astfel de presupunere întîmpină obiecții, mai ales dacă ne referim la unele interpretări teoretice. De aceea, se consideră mai departe că sursa de radiații gama, care a erupt la 5 martie 1979 este legată de un pulsar în domeniul X cunoscut în direcția respectivă, perioada acestuia fiind de 8,1 secunde. Dacă o astfel de legătură ar fi reală, s-ar putea considera că radiațiile gama sînt produse prin același mecanism ca și radiațiile X, erupția fiind determinată de condițiile speciale în care se găsește obiectul respectiv la faza de trecere de la pulsar gama la faza de pulsar X.

Încercînd să dezlege enigma legată de erupția de la 5 martie 1979, unii cercetători consideră că eliberarea respectivă de energie este legată de anumite probleme de gravitație și nu ar reprezenta difuzia unor fotoni convenționali. În acest sens, se caută o stea neutronică vibratorie în care energia este

transportată prin vibrații de la interior spre exterior, spre crustă. Din cauza densității extrem de mari a substanței neutronice, acest fel de transport de energie se realizează, aproximativ, cu viteza luminii, fapt concordant cu erupția aproape instantanee.

Procesul de transformare a energiei vibratoare în radiații gama trebuie să dureze atît timp cît steaua continuă să vibreze, amortizarea fiind în principal atribuită radiației gravitaționale. De aceea, se presupune că evenimentul de la 5 martie 1979 ar fi dus, deși indirect, la prima detectare a radiației gravitaționale. Din păcate, detectoarele pentru o astfel de radiație sînt prea puțin sensibile, iar confirmarea directă se lasă așteptată.

Compararea dintre rezultatele obținute în domeniile gama și X arată că este foarte probabil ca erupțiile de la 5 și 6 martie 1979, precum și cele de la 4 și 24 aprilie din același an, să aparțină unuia și aceluiași pulsar — FXP 0520 — 66. Astfel de evenimente sînt greu de observat. Totuși, se poate presupune că există și alte obiecte asemănătoare care ar putea deveni observabile. În acest din urmă caz s-ar putea vorbi despre o clasă specială de erupții gama, observarea lor fiind îngreunată și de distanța mult prea mare la care ar fi situate. Fără îndoială, pulsarul FXP 0520-66 conține steaua neutronică cea mai apropiată de noi, ea fiind situată la depărtarea de numai 30 pc ($\sim 10^{8}$ milioane km ; Soarele se află la 150 milioane km).

În afara evenimentelor legate de FXP 0520-66, în total, în perioada septembrie 1978 — februarie 1980, s-au mai observat 11 astfel de erupții, iar localizarea lor a arătat că ele ar fi legate de alte 9 obiecte. Dintre acestea, un interes deosebit îl prezintă erupțiile succesive de la 24, 25 și 27 martie 1979, care, de asemenea, proveneau de la o sursă comună. Este vorba aici de un al doilea caz, după FXP 0520-66, care prezintă încredere pentru stabilirea fenomenului de erupție recurentă. Aceasta a doua sursă de erupții gama a primit notația B 1900 + 14.

Trebuie să amintim aici și faptul că erupțiile gama (țîșniturile) se deosebesc de cele înregistrate în domeniul X (bursteri), atît prin durata lor scurtă cît și prin cantitatea mare de energie pe care o revarsă.

Radiații gama difuze

Din examinarea rezultatelor obținute cu aparatele amplasate la bordul sateliților SAS-2 și COS-B rezultă că radiațiile gama cu aspect difuz se concentrează spre planul galactic, această situație putînd fi o consecință a ciocnirii dintre razele cosmice și materia interstelară, sau ar putea să reprezinte o însumare a radiațiilor gama care provin de la mai multe surse discrete, dar încă nerezolvate, existența acestora din urmă putînd fi precizată numai cu detectoare de mare sensibilitate. De aceea, detectînd radiațiile gama în Galaxie, ne putem da seama de densitatea materiei interstelare și, prin aceasta, ne putem forma o imagine mai completă despre structura sistemului nostru stelar. Această situație ne arată încă o dată că cercetarea razelor cosmice poate da informații în legătură cu proprietățile astrofizice ale Galaxiei la distanțe mari.

Dacă, așa cum am specificat mai sus, radiația gama, observată în direcțiile conținute de planul discului galactic, este un rezultat al interacțiunii dintre razele cosmice și mediul interstelar, atunci trebuie să existe un strat de praf care să ajungă pînă la cîteva sute de ani lumină deasupra și dedesubtul planului galactic.

Rezultatele obținute de COS-B scot în evidență prezența unei radiații gama, în interiorul Galaxiei, mult mai intensă decît aceea care ar putea fi generată prin ciocnirea razelor cosmice cu hidrogenul atomic din discul galactic. Foarte probabil că prezența hidrogenului molecular ar fi mult mai eficientă.

Datorită observațiilor efectuate de satelitul COS-B, astăzi dispunem de prima hartă a cerului în domeniul gama. În figura 6.1 este prezentată harta cerului cu sursele de radiații gama. Cele mai multe dintre acestea sînt inobservabile în alte domenii spectrale. Obiectele observate în raze gama se situează de-a lungul ecuatorului galactic, această distribuție lăsînd să se înțeleagă că acești aștri misterioși sînt o manifestare a unor stele foarte tinere din Galaxie, în vecinătatea imediată a planului galactic, unde are loc procesul de formare a stelelor.

6.3. Astronomia extragalactică în radiații gama

Cu ocazia prelucrării datelor observaționale obținute de COS-B, s-a constatat că sursele de raze gama sînt deosebit de interesante și pentru astronomia extragalactică, mai ales atunci cînd se caută o legătură între sursele de acest fel și quasari. În mod deosebit apare interesul pentru astfel de cercetări atunci cînd se presupune că nucleele anumitor quasari sau radiogalaxii ar conține surse puternice de energie înaltă care să fie emisă în domeniul radiațiilor gama.

Printre obiectele extragalactice care au fost propuse pentru observații în domeniul radiațiilor gama amintim aici binecunoscutul quasar 3C 273 care a fost observat de către satelitul COS-B în domeniul spectral delimitat de 50 și 500 MeV. Cu această ocazie s-a apreciat că, în acest domeniu, obiectul 3C 273 are o luminozitate de circa 3.10^{14} erg/s.

Așadar quasarul 3C 273 își revarsă cea mai mare parte din energie în domeniul radiațiilor gama și nu în domeniul radio în care a fost descoperit Deci, COS-B a repus în discuție o serie de teorii care fuseseră avansate mai înainte pentru a explica radiația observată a quasarilor.

Cum am mai amintit, quasarul 3C 273 este o sursă puternică și de radiații X. Mai mult, în acest din urmă domeniu spectral, obiectul 3C 273 este o sursă cu strălucire variabilă, variabilitatea respectivă avînd perioada de circa 50 000 secunde, fapt care duce la *limita superioară* a diametrului ca fiind de acest ordin de secunde de lumină (timpul în care lumina poate parcurge diametrul respectiv). De aici se ajunge la concluzia că diametrul lui 3C 273 ar fi de circa $1{,}5 \cdot 10^{10}$ km, numai cu puțin mai mare decît diametrul orbitei planetei Pluto.

O problemă interesantă se ridică în cazul obiectelor care emit radiație gama de același ordin de mărime ca și aceea emisă în domeniul X. În astfel de cazuri se poate întîmpla ca razele gama să interacționeze cu fotoni din radiațiile X emise de aceeași sursă pentru a da naștere la perechile de particule : pozitron și electron care, la rîndul lor, se vor anihila producînd radiații gama, dar cu energii mai mici. De aceea, pentru ca observațional să se poată detecta cele două feluri de radiație ar trebui să presupunem că ele sînt emise sub

formă de fascicule paralele. Dar cum s-ar putea emite astfel de fluxuri este o altă problemă, la fel de greu de înțeles.

Mecanismul care ar fi capabil să asigure energia de ordinul de mărime amintit mai sus trebuie să se găsească în interiorul volumului cu diametrul de circa $1{,}5 \cdot 10^{10}$ km. Dar într-un volum așa de mic nu se poate presupune că acționează numai fuziunea nucleară care este sursa de energie stelară. De aceea, se presupune că aici ar trebui să existe o gaură neagră (black hole) cu masa mai mare decît 10^6 mase solare, obiect care ar putea să întrețină un debit de energie atît de mare.

Este vorba de o presupunere, dar viitoarele observații în domeniul gama vor aduce noi dovezi observaționale care să stea la baza unor modele teoretice demne de încredere.

În anul 1974, în cadrul unui experiment efectuat cu aparatele de la bordul unui balon s-a examinat radiația emisă de cea mai apropiată radiogalaxie — Centaurus-A. Cu această ocazie au fost evidențiate liniile spectrale din domeniul radiațiilor gama la 1,6 și 4,5 MeV. Considerînd aceste rezultate ca fiind reale, se trage concluzia că sursa respectivă emite, în aceste linii cantitățile uriașe de energie de $2{,}6 \cdot 10^{42}$ și respectiv $2{,}2 \cdot 10^{43}$ erg/s. Soarele, în întreg spectrul electromagnetic emite $3{,}86 \cdot 10^{33}$ erg/s.

N-ar fi exclus ca linia de la 1,6 MeV să fie linia lui ^{20}Ne (1,63 MeV) lărgită de efectul Doppler. Linia de la 4,43 MeV aparține radiației nucleului excitat ^{12}C.

Galaxia Seyfert NGC 4151 a fost urmărită cu aparatele de la bordul lui CSO-B între 26 mai și 5 iunie 1977, pe cînd la 22 mai observațiile au fost efectuate cu un telescop pentru raze gama amplasat la bordul unui balon. S-a apreciat că, în domeniul spectral cu energie mai mică de 3 MeV, această galaxie emite 10^{45} erg/s, iar în domeniul delimitat de 2 și 10 keV (radiații X) emisia este de numai $7 \cdot 10^{42}$ erg/s.

Dacă și celelalte galaxii Seyfert, care sînt surse X, emit ca și NGC 4 151, atunci ele ar trebui să fie detectate cu tehnica de care se dispune în zilele noastre.

6.4. Modele de mecanisme pentru emisia radiațiilor gama

Periodicitatea de 8,1 secunde stabilită pentru pulsurile sursei care a erupt la 5 martie 1979 arată în mod evident că

acolo s-ar putea găsi o stea neutronică în rotație, dar care este slabă în domeniul optic și este o sursă radio liniștită. De aici s-ar desprinde concluzia că, în acest caz, cîmpul magnetic al stelei nu are o orientare deosebită față de linia de vizare, altfel intensitatea lui trebuie să fie extrem de redusă.

Observarea erupțiilor de raze gama a ridicat o serie de probleme pe care trebuie să le luăm în considerare atunci cînd se încearcă să se elaboreze un model teoretic pentru emisia generală din domeniul radiațiilor gama. Enumerăm aici cîteva dintre aceste probleme.

Cîte evenimente de acest fel se pot înregistra? Care este structura fizică a surselor de radiații gama? Care este mecanismul prin care se produc radiațiile cu energii înalte? Cum se corelează rezultatele recepționate în domeniul gama cu cele din alte domenii spectrale? Există oare un grup de obiecte care să fie caracterizate în general prin emisie de radiații gama și radiații X? etc.

Pentru a răspunde la unele întrebări de felul celor enumerate mai sus au fost elaborate modele teoretice dintre care amintim aici cîteva, deși nici unul dintre ele nu este capabil să reproducă pe deplin datele observaționale.

a) *Modelul impactului dintre o stea neutronică și un asteroid*

În cadrul acestui model se consideră că o stea neutronică face parte dintr-un sistem planetar, spațiul dintre stea și planete putînd fi umplut cu asteroizi sau unele rămășițe ale acestora. De aceea se poate presupune că, din cînd în cînd, steaua respectivă este lovită de unele corpuri compacte, energia cinetică a impactului fiind transformată în radiație electromagnetică în mai puțin de 0,001 secunde. Din păcate, în aproximativ același interval de timp, din cauza izbiturii, în acea regiune apare un nor de gaz de densitate mică, dar care acoperă suprafața stelei, împiedicînd radiațiile gama să se propage spre exterior. Eventual un cîmp magnetic cu intensitatea de vreo 10^{12} Gs ar împiedica apariția norului de gaz, iar „erupția“ ar deveni observabilă.

Prezența cîmpului magnetic puternic ar face ca impactul asteroidului să-l transforme pe acesta din urmă într-un fel de panglică subțire, de numai cîțiva milimetri în longitudine

magnetică și de cîțiva kilometri în latitudine magnetică. Densitatea unei astfel de fîșii ar fi de un milion de grame/cm^3. Această densitate mare se explică prin aceea că, în timpul impactului, asteroidul face o „groapă“ de circa 20 m adîncime, materia scoasă din groapă, din steaua neutronică, fiind foarte densă. Se formează astfel un fel de vînt de plasmă fierbinte care este dirijat de cîmpul magnetic. Radiația de la această materie ejectată ar determina erupția de raze gama. Pe baza acestui model, durata evenimentului de la 5 martie 1979 s-ar explica prin prezența unor variații în parametrii fizici corespunzători. În același timp, variația periodică în luminozitate ar putea fi o indicație a faptului că axa magnetică și cea de rotație axială ar forma între ele un unghi destul de mare.

Modelul prezentat aici explică în detaliu proprietățile radiațiilor gama, dar noile observații aduc date suplimentare care pun la îndoială justețea acestuia.

b) *Modelul bazat pe exploziile de supernove*

Unul dintre primele modele elaborate pentru explicarea originii radiațiilor gama este bazat pe cercetarea nucleelor radioactive care apar în faza explozivă a unei supernove, fază în care se derulează nucleosinteza. Observarea unor linii spectrale ar putea constitui astfel o observare directă a procesului de nucleosinteză. O astfel de presupunere este bazată și pe constatarea că între resturile de supernove și pulsari există o anumită corelație. Prin urmare, cel puțin o parte din sursele de radiații gama galactice ar putea fi legate de resturile de supernove.

Supernovele pot reprezenta cele mai intense surse discrete în domeniul radiațiilor gama datorită procesului de nucleosinteză a nucleelor radioactive care au viață lungă și care prin dezintegrare emit radiații gama, acestea din urmă putînd fi observabile numai după ce nebuloasa (creată prin explozia de supernovă) a devenit destul de transparentă. În asemenea cazuri liniile cele mai puternice ar corespunde la dezintegrarea atomului ^{56}Co, vizibilitatea acestora depinzînd însă de masa nebuloasei și de viteza de dilatare corespunzătoare. Calculele arată că dacă nebuloasa are o masă egală cu masa solară și se dilată cu viteza de circa 10^4 km/s, trans-

parența pentru razele gama s-ar realiza după circa 0,3 ani de la explozie. După un astfel de interval de timp radiațiile gama, generate de dezintegrarea lui ^{56}Co ar deveni observabile. În mod analog s-ar petrece lucrurile și cu dezintegrarea altor elemente. De aceea, foarte probabil, ar deveni observabilă linia de la 1,156 MeV, care este determinată de dezintegrarea lui ^{44}Sc, linia de la 1,275 MeV condiționată de dezintegrarea lui ^{22}Na, pe cînd linia de la 0,122 MeV ar fi legată de ^{57}Co.

Pe de altă parte, stelele masive au o distribuție spațială în vecinătatea planului galactic și își parcurg traseul evolutiv într-un timp relativ scurt, faza finală a evoluției fiind însoțită de explozia de supernovă. Resturile supernovelor sînt interesante surse de radiații radio și conțin un număr însemnat de electroni relativiști. În cazul în care între observator și un rest de supernovă se găsește un nor dens de materie interstelară, electronii relativiști vor suferi o frînare cînd ajung la materia norului. Se produce astfel o emisie de frînare cu lungimea de undă în domeniul radiațiilor gama. Observațiile arată că 9 din sursele de radiații gama se află în astfel de condiții. Se presupune că în acest mod s-ar putea explica natura acestui tip de radiații.

Totuși, deoarece radiații gama s-au înregistrat și de la obiectele extragalactice, cum sînt quasarii sau unele radiosurse, modelul de mai sus trebuie privit cu oarecare rezervă. În orice caz, dacă astronomia va dovedi existența unor „stele gama", vom fi nevoiți să ne formăm o nouă concepție despre originea radiațiilor cosmice și, mai ales, va trebui să ne stabilim un nou punct de vedere cu privire la natura surselor de radiații gama.

c) *Modelul regiunilor de hidrogen ionizat* (H II)

Foarte probabil că unele surse de radiații gama sînt corelate atît cu resturile de supernove, cît și cu unele regiuni de hidrogen ionizat, aceste două categorii de obiecte fiind și ele corelate, într-o anumită măsură. Un exemplu de o astfel de asociere îl reprezintă sursa radio Cassiopeia-A (restul de supernovă + regiune de hidrogen ionizat). Iată de ce este instructiv să presupunem că, în astfel de cazuri, radiațiile gama sînt generate prin procesul bremsstrahlung al fotonilor *Lyman — alfa* emiși de regiunea asociată H II și prin difuzia

Compton a electronilor relativiști care provin de la emisia radio. În astfel de cazuri, fluxul de radiații gama recepționate poate furniza informații cu privire la densitatea electronilor relativiști și intensitatea cîmpului magnetic.

d) *Modelul bazat pe acțiunea reciprocă dintre razele cosmice și mediul gazos interstelar*

Unul dintre cele mai eficace modele pentru radiațiile gama are la bază presupunerea că radiațiile gama ar fi generate prin acțiunea reciprocă dintre razele cosmice și mediul gazos interstelar. Este vorba aici de ciocnirile inelastice dintre nucleele din razele cosmice și materia interstelară în urma cărora apar mezonii π^0 (pioni neutri) care sînt instabili și se dezintegrează în fotoni de radiații gama. Nucleele respective — protoni cu energie înaltă — ar putea proveni, de exemplu, de la anumite resturi de supernove. În astfel de cazuri, energia radiației gama va reprezenta o fracțiune importantă din energia electronilor respectivi. Rata producției de energie este proporțională cu produsul fluxului de electroni și densitatea materiei interstelare.

Avînd în vedere faptul că radiațiile cosmice, în marea lor majoritate, sînt alcătuite din fotoni și nuclee grele (numai 1% este reprezentat prin electroni) ne-am aștepta ca acțiunea dintre radiațiile cosmice și mediul interstelar să reprezinte un fenomen preponderent în producția de radiații gama. De aceea, cercetarea fotonilor gama ar putea să ducă la evidențierea nucleelor cosmice pe care le-au admis pionierii astronomiei gama. Prin astfel de cercetări astronomia energiilor înalte trebuie să aducă informații valoroase cu privire la cercetarea istorică și fizică a radiațiilor cosmice și să sondeze astfel cele mai agitate regiuni din Univers.

e) *Modelul bazat pe acreția de masă*

Un alt model, pentru explicarea generării energiei emisă sub formă de radiații gama, se bazează pe presupunerea existenței acreției de masă pe obiectele compacte — stele neutronice sau găuri negre. Emisia de linii spectrale în domeniul radiațiilor gama, de la stele neutronice, poate avea loc printr-o serie de procese fizice : radiația ciclotron, anihilarea perechii

pozitron-electron, captarea neutronică și interacții nucleare în procesul acreției de masă. Se pare că au fost detectate linii care să corespundă la toate aceste tipuri de procese. Linia ciclotron de la 58 keV a fost înregistrată în emisia stelei Hercules X-1, cu oarecare variație în intensitate. Această variație este determinată de un cîmp magnetic de circa $5 \cdot 10^{12}$ Gs, un astfel de cîmp găsindu-se în general în jurul unui pulsar.

Chiar dacă liniile ciclotron nu sînt tipice pentru domeniul astronomiei gama, ele au implicații deosebit de importante aici. Prezența lor arată că în sursele respective există un cîmp magnetic foarte intens, $B > 10^{12}$ Gs. În acest domeniu spectral, observarea pulsarului din Nebuloasa Crab a pus în evidență prezența unei linii la 73 keV, linie care conduce la luminozitatea de $2 \cdot 10^{35}$ erg/s, dacă nebuloasa respectivă se află la distanța de 2 kpc.

Liniile ciclotron se formează în urma tranzițiilor electronilor între nivelele energetice cuantificate, iar lărgimea acestora depinde atît de temperatură, cît și de unghiul dintre linia de vizare și orientarea axei magnetice.

Cu un detector amplasat la bordul unui balon, la 10 iunie 1974 s-a observat o sursă temporară de radiații gama care a durat circa 20 minute și era caracterizată prin prezența unuia dintre cele mai puternice procese de emisie nucleară cunoscute în natură — anihilarea dintre pozitron și electron. Au fost identificate liniile de emisie de la 0,40 — 0,42 MeV și cele de la 1,74 — 1,86 MeV. Aceste rezultate, ca și cele recepționate la 10—11 mai 1976, au venit din direcția Nebuloasei Crab și pot fi considerate ca fiind determinate de una și aceeași sursă.

Producție importantă de perechi pozitron-electron (e^+ și e^-) ar putea să aibă loc, în prezența unui cîmp magnetic puternic, în jurul stelelor neutronice. Anihilarea reciprocă dintre cele două particule lîngă suprafața stelei ar duce la o deplasare spre roșu gravitațională a liniei de emisie de la 0,511 MeV. O astfel de linie a fost observată în direcția Nebuloasei Crab, cu un telescop amplasat la bordul unui balon și s-a evaluat o deplasare spre roșu $z = 0{,}285$. De aici s-a apreciat că la pulsarul Crab masa stelei neutronice este cuprinsă între 1,4 și 1,8 mase solare, raza corespunzătoare fiind de 10—13 km,

Acreția de materie pe obiectele colapsate — stele neutronice sau găuri negre — a fost sugerată de mai multe ori ca un mecanism pentru generarea de radiații gama, atît în cazul surselor permanente, cît și pentru cele temporare. În cazul unei stele neutronice, emisia de raze gama ar putea proveni de la interacțiunile ce au loc între nucleele materiei care cade pe steaua considerată și substanța de care aceasta se lovește la impactul cu steaua respectivă.

A fost sugerată ideea că neutronii și pozitronii, care au fost captați și anihilați în vecinătatea unei stele neutronice și a însoțitorului său (în cazul unor sisteme duble), au fost produși prin reacții termonucleare care au loc atunci cînd gazul curge episodic de la companion spre steaua neutronică.

În fine, s-a mai sugerat ideea că acreția sferică de masă din jurul găurilor negre ar putea să constituie o sursă puternică pentru liniile de emisie din domeniul radiațiilor gama.

După cum se știe, liniile spectrale din domeniul gama pot suferi deplasări spre roșu sau spre violet, în conformitate cu efectul Doppler, dar o deplasare spre roșu poate avea loc și atunci cînd regiunea care radiază este scufundată într-un puternic cîmp gravitațional al unui obiect compact cum ar fi, de exemplu, o stea neutronică sau o gaură neagră. În astfel de cazuri, cuantele gama pierd o parte din energia lor în efortul depus pentru a învinge forța de atracție corespunzătoare. În cîmpurile foarte puternice ale găurilor negre, cuantele gama pierd toată energia și nu mai pot să iasă spre exterior.

Considerațiile teoretice prezentate mai sus au fost confirmate pe cale observațională. Astfel, cu un detector de rezoluție mică al misiunii Apollo 16, la 27 aprilie 1972 s-a observat o sursă temporară de radiații gama, emisia acesteia fiind determinată printr-un proces de acreție. Maximul de intensitate al acestei surse a avut loc în jurul lungimii de undă care corespunde energiei de 4 MeV.

e) *Locul pulsarilor în astronomia gama*

În timpul prezentării considerațiilor de mai sus, de mai multe ori am făcut referiri la radiațiile gama recepționate de la Pulsarul Crab și cel din Vela. De asemenea, am arătat că

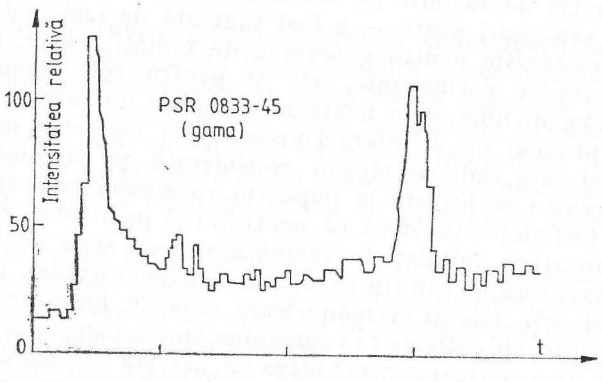


Fig. 6.2. Curba de lumină a pulsarului din Vela ; observațiile au fost colectate de satelitul COS-B în radiații gama.

satelitul COS-B înregistrase radiații gama care veneau de la 4 surse identificate cu pulsari cunoscuți în alte domenii spectrale. În figura 6.2 este prezentată curba de lumină a pulsarului din Vela, observată în radiații gama.

Un rezultat surprinzător a fost și acela care s-a obținut prin înregistrarea radiațiilor gama de la pulsarii PSR 1747-46 și PSR 1818-04. Pentru explicarea radiațiilor recepționate de la aceste obiecte s-a emis ipoteza conform căreia partea principală a energiei care se eliberează prin „frînarea" stelei neutronice trebuie să se transforme în radiație gama. Iată de ce s-a tras concluzia întrebătoare: „Oare nu cumva toate sursele de radiații gama sînt legate de pulsarii cunoscuți și în alte domenii spectrale?".

Aparatele de la bordul satelitului COS-B au înregistrat radiații gama de la sursa 2CG 065+0, stabilind astfel că aceasta coincide cu pulsarul PSR 1953. În presupunerea că distanța pînă la acest pulsar este de 3,5 kpc, energia emisă în domeniul gama este de $13 \cdot 10^{35}$ erg/s. Curba de lumină a acestui pulsar este asemănătoare cu aceea a lui Hercules X-1 (vezi figura 2.6).

Pe harta cerului, în domeniul gama (vezi fig. 6.1) se constată că, în mare parte, sursele de radiații gama se situează

în vecinătatea planului galactic, fapt care arată o concordanță cu ipoteza că pulsarii se nasc în vecinătatea acestui plan. După cum se știe, pulsarii cunoscuți au mari viteze de îndepărtare în raport cu planul galactic, față de locul unde s-au format. De aici tragem concluzia că emisia de energie în domeniul gama ar fi o caracteristică a stadiilor timpurii din viața pulsarilor, emisia acestora fiind mai mică în alte domenii spectrale. Totuși, periodicitățile corespunzătoare se determină cu mai mare dificultate în domeniul gama, mai ales dacă nu se dispune de observații efectuate și în alte domenii spectrale.

Emisia de radiații gama poate juca un rol important în problemele legate de evoluția pulsarilor : pentru pulsarii Crab și Vela energia emisă sub formă de radiații gama este de 10 000 — 100 000 de ori mai mare decît aceea emisă în domeniul undelor radio. Satelitul COS-B a furnizat date valoroase despre acești pulsari, astăzi fiind cunoscut faptul că există asemănări remarcabile între spectrele și curbele de lumină corespunzătoare. În plus, în cei șapte ani cît a activat COS-B, s-au putut semnala modificări și în aspectele curbelor de lumină.

În general, pentru a explica mecanismul prin care se emite energia sub formă de pulsuri, s-a presupus că în jurul unor obiecte — stele colapsate — există roiuri de particule cu energie înaltă. Prin considerații de electrodinamică cuantică se poate arăta că radiațiile gama, pe care le emit pulsarii, apar în urma interacțiunii dintre electronii și pozitronii relativiști în cîmpurile electromagnetice puternice.

Electronii și pozitronii, care au o componentă a cantității de mișcare perpendiculară pe liniile de forță ale cîmpului magnetic, spiralează în jurul liniilor respective. Dar, deoarece acest cîmp este foarte intens, spiralele acestor particule sînt foarte strînse, iar energia legată de mișcarea respectivă este radiată foarte rapid sub formă de radiație sincrotron. Procesul radiativ se desfășoară atît de rapid încît particulele amintite au tendința să se deplaseze strict de-a lungul liniilor de forță. În astfel de cazuri curbura traiectoriilor devine egală cu aceea a liniilor de forță, iar particulele emit radiații de același tip ca și radiația sincrotron, aceasta fiind întîlnită în literatura astronomică sub denumirea de *radiație de curbură*.

f) *Natura erupțiilor de radiații gama*

Așa cum am subliniat mai înainte (vezi erupția de la 5 martie 1979), există surse cu erupții de radiații gama ale căror recurențe s-au stabilit cu încredere : pulsarul FXP 0520-66 și obiectul B 1900 + 14.

Desigur, cercetarea unor astfel de evenimente este încă la început, de aceea și explicarea naturii proceselor fizice, care stau la baza lor, trebuie acceptată ca atare. Menționăm aici două din eforturile depuse : pe de o parte se consideră că pe steaua neutronică are loc o acreție de masă în mod discontinuu, iar pe de altă parte se presupune că fenomenul de atingere dintre masa captată și suprafața stelei neutronice determină niște arderi termonucleare eruptive.

În cazul pulsarului FXP 0520-66 se presupune că există o stea neutronică într-un sistem binar, cu distanță mare între stelele componente și orbită eliptică ($e \gg 0$). Steaua neutronică trebuie să aibă cîmp magnetic intens, pentru ca în procesul de acreție plasma să se miște de-a lungul liniilor de forță, iar regiunea de la care vin radiațiile să se găsească în vecinătatea polilor magnetici. Din cauza excentricității mari, distanța dintre stelele componente se modifică considerabil și, o dată cu aceasta, se produc modificări și în procesul de acreție. Avem de-a face cu o *acreție discontinuă*, cu consecințele corespunzătoare și în luminozitate.

Datele observaționale arată că energia erupției de la 6 martie 1979 este de aproximatic $5 \cdot 10^{-3}$ din aceea a erupției de la 5 martie 1979, acest raport fiind tipic pentru energiile gravitaționale și termică de la suprafața unei stele neutronice. Apoi, dacă se utilizează acest raport pentru evaluarea vitezei de acumulare a substanței fierbinți, pentru starea dintre erupții a pulsarului respectiv, se evaluează luminozitatea de $10^{32} - 10^{33}$ erg/s.

Pe de altă parte, dacă recurența erupțiilor gama este determinată prin reacții termonucleare, trebuie găsită o explicație pentru asemănarea dintre spectrele energetice din stările de „calm" și spectrele din stadiile de pulsație. Radiația gama a erupției de la 5 martie 1979 a fost în mod sigur legată de procesul de acreție.

Detectarea liniilor ciclotron și de anihilare în spectrele erupțiilor de radiații gama (cazul erupției de la 5 martie 1979)

aduce dovezi convingătoare despre legătura existentă între stelele neutronice și erupțiile respective. Cu toate acestea, și aici se ivesc o serie de probleme care sînt greu de rezolvat.

Caracteristicile energetice, deduse din datele observaționale, fac posibilă evaluarea cantității de substanță care cade pe suprafața stelei neutronice. Pentru ca să apară o erupție de radiații gama s-a apreciat că ar fi necesare vreo $10^{19} - 10^{20}$ g de substanță care să cadă pe steaua respectică cu rata de circa 10^{18} g/s. Dar o astfel de acreție nu se poate realiza în magnetosfera unei stele neutronice singuratice care să capteze materie numai din spațiul interstelar. De aceea se presupune că avem de-a face cu un sistem stelar dublu, unde steaua neutronică captează substanța care a fost ejectată de către steaua însoțitoare, aceasta din urmă fiind o stea normală. Dar și această ipoteză este supusă observațiilor critice.

Datele observaționale arată că majoritatea erupțiilor de radiații gama au loc undeva deasupra planului galactic, la distanțe mai mari de 1 kpc. De aceea, însoțitoarea stelei neutronice nu poate fi o stea masivă de tipul spectral timpuriu. Determinarea precisă a direcției în care se găsește sursa erupției de la 5 martie 1979 arată că steaua normală (însoțitoarea) trebuie să fie o stea pitică, cu magnitudinea absolută $M > 10$. Dar o astfel de stea nu-și umple lobul Roche și, în consecință, nu generează un vînt stelar sau curenți de substanță cu intensitate suficient de mare.

Pentru a ocoli neajunsurile menționate mai sus, unii autori presupun că ar fi vorba de erupții chiar pe suprafața stelei normale, în timpul cărora materia ejectată ar putea să atingă sau să depășească lobul Roche corespunzător și, în consecință, fenomenul de acreție să devină posibil. Ar fi vorba aici de niște erupții asemănătoare cu acele din cazul piticelor roșii de tipul stelei UV Ceti. Totuși, observațiile din ultimul timp efectuate cu telescoape de la sol, deși au urmărit o parte îngustă a bolții cerești unde au fost semnalate erupții gama, nu au pus în evidență variații în strălucirile stelelor corespunzătoare. În plus, trebuie să mai avem în vedere unele presupuneri cu privire la conținutul stelei neutronice, precum și posibilitatea „ruperii" plasmei de stea în urma instabilității la scală mică de timp. O astfel de acreție nestaționară a mai fost luată în considerare la discutarea pulsarilor în radiații X.

Tot în vederea explicării radiațiilor gama s-a făcut apel la rolul pe care l-ar putea juca aici efectul Compton. Este vorba de acțiunea reciprocă dintre radiație și electronii din plasma captată și consecințele acesteia asupra modului de dezvoltare a erupției. Tot aici trebuie să avem în vedere spectrul radiației emise și evoluția acestuia în timp.

Deși apar o serie de greutăți cu privire la teoretizarea erupțiilor de radiații gama, mai ales în acceptarea acreției de masă pe o stea neutronică, putem fi siguri că noile date observaționale vor îmbogăți considerabil cunoștințele noastre despre sursele unor astfel de radiații, modelarea teoretică devenind și mai eficientă. Și în acest caz, corelarea rezultatelor obținute în diferite domenii spectrale va fi de un real folos.

În legătură cu perspectivele de viitor ale astronomiei gama, printre altele, se prevede următorul plan de acțiune:

— În domeniul spectrului cuprins între 20 MeV și 30 MeV se vor cerceta sursele de radiații gama la care se vor determina poziția, intensitatea radiației, spectrul energiei și, unde va fi posibil, variațiile corespunzătoare în timp.

— Se va urmări identificarea dintre sursele de radiații gama și obiectele corespunzătoare din alte domenii spectrale.

— Se vor cerceta resturile de supernove și corelația dintre acestea și radiațiile cosmice.

— Se vor înregistra și analiza noi erupții puternice în domeniul gama.

— Se va întocmi un tablou detaliat al emisiei difuze în domeniul gama din interiorul Galaxiei, acesta fiind necesar pentru unele informații cu privire la: structura spirală a sistemului nostru stelar, norii galactici de materie interstelară natura și dimensiunile centrului galactic, precum și extensiunea discului galactic.

— Se va urmări emisia de radiații gama de la alte galaxii, mai cu seamă la cele care sînt foarte luminoase în alte domenii spectrale.

Dar pentru cercetarea unor probleme de felul celor amintite mai sus este necesar să fie lansate noi aparate dincolo de păturile dense ale atmosferei terestre, puterea de separare a acestora trebuind să fie din ce în ce mai mare. În acest scop au fost anunțate deja unele lansări dintre care amintim aici cîteva.

Statele unite ale Americii și-au propus să lanseze un „Observator de radiații gama" care pentru acest domeniu, să reprezinte ceea ce a fost UHURU pentru astronomia în radiații X.

Uniunea Sovietică, în colaborare cu Franța intenționează să realizeze programul GAMM I, prin intermediul unor aparate care să localizeze sursele respective cu o eroare de cel mult 10 minute de arc.

Pe de altă parte, Franța și-a propus să realizeze o hartă a cerului în domeniul gama, cu o rezoluție unghiulară mare care, în domeniul delimitat de 30 și 2 000 keV, să asigure o poziționare (localizare) cu o eroare de numai cîteva minute de arc.

Capitolul 7

DIN ENIGMELE GALAXIEI

În capitolele precedente ne-am referit la cunoştinţele pe care astronomii le-au acumulat în legătură cu Universul observabil şi obiectele cu care acesta este populat. În mod deosebit am subliniat rezultatele obţinute de astronomia invizibilului, evidenţiind şi gradul de certitudine cu care s-au obţinut anumite rezultate.

De mult timp a devenit proverbială expresia „Cu precizie astronomică". Ea este utilizată pentru evidenţierea unei punctualităţi deosebite, aceasta fiind un rezultat al concordanţei dintre desfăşurarea unor evenimente şi prevederea lor prin teoria matematică.

Cu toate acestea, în expunerea de mai sus am fost obligaţi să utilizăm expresii de forma : foarte probabil, după cît se pare, ar fi vorba de, după părerea lui, ... Prin urmare, în cursul expunerii ne-am referit la stadiul actual al cercetărilor astronomice, prezentînd şi acele probleme care încă mai sînt în curs de cercetare, rezultatele nefiind încă finalizate.

În prezent, mijloacele de informare fac posibilă comunicarea rapidă a descoperirilor ştiinţifice, chiar dacă natura fenomenelor observate nu este bine înţeleasă. Aşadar, pe lîngă îmbogăţirea cunoştinţelor noastre privind anumite corpuri cereşti, de mult timp cunoscute în domeniul optic, astronomia invizibilului a evidenţiat şi trăsături neînţelese ale acestora. În plus, au fost descoperite şi obiecte cu totul necunoscute mai înainte. Iată de ce se poate afirma că, pe lîngă punerea la punct a unor situaţii neclare mai înainte, astronomia invizibilului a scos la iveală şi probleme noi ale căror soluţii sînt aşteptate cu multă nerăbdare. S-au evidenţiat enigme noi legate atît de unele obiecte cunosute, cît şi obiecte noi despre natura cărora vorbesc doar presupunerile. Dar pentru analiza unor astfel de ipoteze sînt necesare noi

tehnici şi noi serii de date observaţionale. Printre obiectele de acest fel se numără şi mult discutatele surse: Eta Carinae şi SS 433.

7.1. Eta Carinae

În constelaţia australă în direcţia unui braţ bogat al Galaxiei noastre, se află marea nebuloasă NGC 3 372. Situată la o distanţă de circa 9 100 ani lumină, această nebuloasă este impresionant de mare şi de activă. După caracteristicile generale ea se aseamănă cu Nebuloasa din Orion, aceasta din urmă fiind una dintre cele mai familiare observatorului. Nebuloasa NGC 3372 se numeşte simplu Nebuloasa din Carina, aici fiind sediul unui număr mare de stele foarte luminoase şi foarte masive ; dintre acestea cea mai renumită este cunoscută sub denumirea de *Eta Carinae* (η Carinae).

Eta Carinae este un obiect unic în felul său. Din unele înregistrări vechi se deduce că prin anul 1603 ea era destul de puţin strălucitoare. Apoi, în anul 1677, Edmund Halley a notat-o ca pe o stea de magnitudine aparentă $m_v = 4$, dar prin anul 1727 această stea era notată ca avînd magnitudinea $m_v = 2$. În anii următori este remarcată prin nişte fluctuaţii puţin sigure ale strălucirii, pe cînd John Herschel, cînd a vizitat emisfera sudică, a rămas uimit văzînd că aceasta avea deja magnitudinea $m_v = 1{,}0$, strălucire care s-a menţinut aproape constantă pe un interval de cîteva luni. Poziţia acestei stele este determinată de coordonatele ecuatoriale $\alpha = 9^h42^m30^s$ şi $\delta = -62°02'$.

În anul 1843, Eta Carinae a suferit o erupţie puternică, ajungînd la strălucirea aparentă $m_v = -1{,}0$. Cu această magnitudine aparentă şi o depărtare de 9 100 ani lumină de la Soare, pentru magnitudinea absolută se obţine $M_v = -12$. Pe atunci Eta Carinae era unul dintre cele mai luminoase obiecte cunoscute în Galaxia noastră. La scurt timp după erupţie, strălucirea respectivă a scăzut ($m_v = 2$) şi a rămas constantă pînă în anul 1858. Apoi s-a ofilit în continuare pentru ca în anul 1870 să devină invizibilă pentru ochiul liber. Cu excepţia unei reveniri la o strălucire mai mare în 1888, Eta Carinae a rămas cu strălucire staţionară ($m_v \approx 6{,}0$) pînă în zilele noastre, cînd are tendinţa de a-şi mări iarăşi

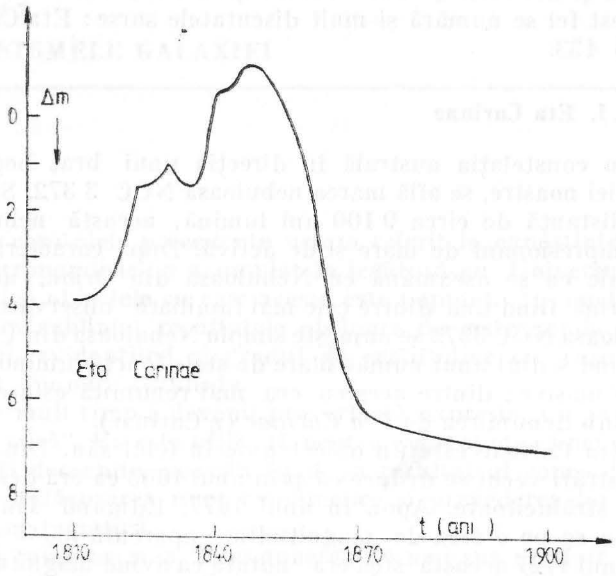


Fig. 7.1. Curba de lumină a stelei Eta Carinae. În ordonată Δm=diferența de magnitudine față de o stea de comparație, în abscisă se găsește timpul exprimat în ani

strălucirea. În figura 7.1 este prezentată curba de lumină a stelei Eta Carinae.

Manifestările spectaculoase ale lui Eta Carinae au trezit interesul mai multor astronomi, care au urmărit-o prin tehnici diferite de observare. Astfel primele observații spectroscopice (efectuate în Peru) din anii 1892 și 1903 au pus în evidență o serie de linii spectrale de absorbție, dar cu puține indicații asupra emisiei. Ulterior, liniile de absorbție au slăbit și au dispărut, pe cînd cele de emisie s-au înmulțit și s-au intensificat. Totuși, natura acestei faimoase variabilități a rămas un mister pentru observatorii respectivi.

Un prim tablou al proceselor fizice legate de variabilitatea lui Eta Carinae a fost cel în care acest obiect era considerat ca o stea normală — o stea supergigantă albastră. În această ipoteză s-a apreciat că suprafața lui Eta Carinae

ar fi fost de vreo 5 sau 6 ori mai fierbinte decît fotosfera Soarelui, pe cînd diametrul era evaluat a fi de vreo 80 — 90 de ori mai mare decît cel solar. În aceste condiții, și pentru a avea o luminozitate atît de mare, se considera că masa corespunzătoare ar fi de circa 100 mase solare. Acesta este motivul pentru care Eta Carinae „devenise" cea mai masivă stea din Galaxie. În astfel de condiții fizice, această stea era ușor de observat cu ochiul liber prin anii '70 ai secolului al 18-lea însă nimic nu se prezenta în formă spectaculoasă. Atunci steaua fiind foarte fierbinte, maximul de energie radiată se găsea în domeniul ultraviolet, invizibil pentru epoca respectivă. Așadar steaua apărea mai puțin luminoasă decît era în realitate și nu se puteau recepționa unele dintre detaliile activității corespunzătoare.

Apoi, prin anii '30 ai secolului al 19-lea, o anumită instabilitate a făcut ca straturile periferice să fie aruncate spre exterior, probabil că pe atunci presiunea de radiație era mai puternică decît atracția gravitațională. În astfel de condiții steaua putea să ejecteze un material de ordinul unei mase solare. Și, pe măsură ce acest material se extindea, răcindu-se, provoca o deplasare spre roșu a radiației care-l traversa. În acest mod, steaua devine mai ușor de observat în domeniul optic, fapt pentru care observatorului terestru i-a apărut ca un fel de erupție în luminozitate. Apoi, din cauza expansiunii, densitatea în straturile respective descreștea iar transparența creștea, efectul asupra radiației se micșora și, aparent, steaua devenea iarăși mai puțin strălucitoare.

În jurul anului 1858, straturile periferice de gaz ejectat, transparente pînă atunci, au început să se răcească din nou, astfel încît praful se condensează în interiorul gazului. Acest praf în curînd va absorbi cea mai mare parte a luminii, producînd astfel o scădere în strălucire încît steaua devenise invizibilă pentru ochiul liber. În acest timp, granulele de praf sînt încălzite de lumina pe care o absorb și, în consecință, vor emite radiație în infraroșu. Granulele respective de asemenea dispersează o anumită fracțiune din lumina vizibilă, fapt pentru care steaua este văzută în expansiune. Astăzi Eta Carinae se poate întoarce la condițiile sale de dinaintea lui 1830, iar peste cîteva decade de aici înainte praful poate să ajungă destul de departe pentru a avea o densitate mai mică,

să fie mai transparent, iar steaua să devină iarăşi strălucitoare aşa cum fusese cu vreo 250 de ani în urmă. Apoi, peste cîteva sute de ani se va produce o nouă explozie şi aşa mai departe.

Aspectul actual al regiunii în care se află Eta Carinae se prezintă ca o nebuloasă subţire şi este determinat de expansiunea materialului care a fost ejectat în cursul mai multor erupţii ale obiectului central. Eta Carinae se găseşte deci scufundată în mod deosebit în materialul ejectat cu ocazia erupţiei din anul 1843 şi-al erupţiei din anii '30 ai secolului trecut, erupţie înregistrată şi de către John Herschel.

În anii '40 din secolul nostru, Enrique Gaviola a cercetat nebuloasa din Carinae şi a ajuns la concluzia că steaua centrală de aici este înconjurată de un material în expansiune, un fel de coajă pe care el a numit-o *homunculus*, un fel de omuleţ deformat şi nedezvoltat. Observaţiile spectroscopice ale acestei configuraţii au scos în evidenţă o structură deosebit de complicată — cu linii de emisie ale fierului şi o abundenţă de alte elemente, fapt care îngreunează extragerea unor informaţii riguroase.

Regiunea cu nebuloasa NGC 3 372 în care este scufundată Eta Carinae are dimensiunile 10×15 secunde de arc, fiind presărată cu o serie de noduri luminoase care sînt în expansiune cu o viteză de circa 600 km/s. Şi aceste noduri fac parte din materialul ejectat cu ocazia erupţiilor. *Homunculus* este înconjurat de o coajă subţire, care are dimensiunile exterioare de 21×29 secunde de arc.

Şi măsurătorile de mişcări proprii ale unor caracteristici din *homunculus* au arătat că este vorba de un material în expansiune. S-a constatat că şi o formaţiune proeminentă care se vede la nord-est, în domeniul albastru, se deplasează cu viteza de 1 300 km/s. Pentru timpul care s-a scurs de la momentul ejecţiei se evaluează aproximativ o sută de ani.

Unele condensări de materie — noduri — se mişcă cu viteze mai mici, ele au fost ejectate cu vreo 500 de ani în urmă. Viteze radiale de ordinul cîtorva sute de kilometri pe secundă sînt de asemenea observate în spectrogramele formaţiunilor din stratul exterior. În plus, în stratul exterior liniile interzise [O II] de emisie şi ale nitrogenului o dată ionizat sînt mai intense decît linia H_α.

Pentru un anumit interval de timp, mai mulţi astronomi au considerat că Eta Carinae ar fi o novă unică în felul ei, în timp ce alţii o consideră ca un tip de supernovă cu un mod lent de manifestare, fapte pentru care acest obiect atrage tot mai mult atenţia astronomilor.

În *domeniul infraroşu*, la lungimile de undă cuprinse între 10 şi 20 μm, Eta Carinae se prezintă ca cel mai strălucitor obiect de pe bolta cerească, după unele obiecte din sistemul solar. La lungimea de undă $\lambda = 20$ μm, şi presupunînd o depărtare de 9 100 ani lumină, pentru luminozitate se obţine o valoare cuprinsă între $2 \cdot 10^6$ şi $5 \cdot 10^6$ $L_\odot$

Se presupune că radiaţia în infraroşu este determinată de emisia termică a particulelor de praf, care se află într-o coajă de dimensiuni aproximativ egale cu cele ale homunculusului, particule aruncate din stea în timpul erupţiei. În general, se presupune că sursa de energie este un obiect (sau o grupă de obiecte) scufundat într-un nor de praf. Aici se poate admite că energia care alimentează radiaţiile optice ale nebuloasei ar fi determinate de prezenţa cîtorva stele de tipul O.

Materialul opac ejectat de stea în imediata vecinătate ne împiedică să înţelegem modul în care acesta obscurează steaua care-l ejectează şi mecanismul prin care se emite un spectru aşa de complex. Totuşi, deoarece are o luminozitate de milioane de ori luminozitatea solară, se apreciază că Eta Carinae trebuie să fie un obiect foarte masiv. S-a emis şi o ipoteză după care Eta Carinae ar fi o stea dublă fizic. De altfel această stea are rata pierderii de masă de $7{,}5 \cdot 10^{-2}$ mase solare pe an. De aceea, pentru ca steaua să fie stabilă în raport cu presiunea internă, masa totală este evaluată la 145 — 160 mase solare.

Existenţa unor condensaţii în învelişul exterior arată că acest material a fost ejectat din steaua centrală cu viteze mari, ele au densităţi mici, iar spectrul se complică pe măsură ce materialul se află la depărtare mai mare faţă de stea. Noile spectrograme relevă linii foarte puternice ale nitrogenului neutru şi ionizat, dar lipsesc liniile oxigenului. De aceea, acest obiect a fost planificat pentru observaţii în ultraviolet cu instrumentele de la bordul satelitului IUE (International Ultraviolet Explorer).

Rezultatele obținute în ultraviolet au fost surprinzătoare. Liniile spectrale ale nitrogenului dublu, triplu și cvadruplu ionizat au fost prezente, dar nu s-au văzut liniile carbonului, acestea din urmă fiind cele mai intense linii în majoritatea spectrelor nebuloaselor. Aceste rezultate sînt deosebit de importante pentru problemele de evoluție stelară, Eta Carinae fiind o stea masivă, dar puțin evoluată. Ea încă nu a ajuns în vecinătatea secvenței principale.

Deoarece Eta Carinae este foarte masivă (peste 100 mase solare) evoluția ei se derulează foarte rapid și nu ar fi surprinzător faptul dacă, într-un viitor apropiat, aceasta ar exploda ca o supernovă.

Radiații X de la regiunea lui Eta Carinae s-au înregistrat pentru prima dată în 1970, cu un detector amplasat la bordul unei rachete. Apoi, regiunea respectivă a fost urmărită de „Copernicus" care, avînd o putere de rezoluție prea mică, nu a putut confirma rezultatele amintite. O detectare definitivă a fost realizată de către sateliții UHURU și Ariel-5, dar ale căror rezultate lăsau o urmă de îndoială cu privire la existența unei surse de intensitate moderată, care emite fotoni cu energie sub 1 keV. În anul 1978 au fost efectuate observații prin intermediul satelitului OSO-8.

Satelitul „Einstein" a arătat că aici este vorba de o regiune în care se află mai multe surse X, emisia acestora contribuind la emisia difuză observată. Prin urmare, radiațiile X observate în nebuloasa NGC 3372 provin de la surse discrete; există aici cel puțin 6 stele de tipul spectral O și una Wolf-Rayet. Eta Carinae este într-adevăr sursă X, dar contribuția ei este de numai 1/20 din radiațiile X moi observate în regiunea respectivă. Luminozitatea în domeniul X a fiecăruia dintre obiectele componente este de circa 10^{33} erg/s. De altfel, întreaga nebuloasă NGC 3372 este inundată de un puternic „foc" de radiații X, al cărui spectru sugerează prezența gazului interstelar fierbinte și se presupune că acesta ar proveni de la exploziile de nove care ar putea fi destul de frecvente.

Generarea de radiații X ar putea fi explicată prin mai multe mecanisme, printre care cel mai frecvent sînt amintite: prezența unei coroane stelare, interacțiunea unui vînt stelar

puternic cu mediul înconjurător sau, în unele cazuri, prezența unor însoțitori compacți etc.

Reamintim aici că *observațiile radio* efectuate la frecvențe joase au arătat că radiațiile din acest domeniu spectral provin de la un mic rest de supernovă existent aici, la numai cîteva minute de arc la est de Eta Carinae. Ulterior a fost detectată linia fierului în domeniul X la energia de 7 keV și a fost interpretată ca provenind de la fierul ionizat existent în acest rest de supernovă. Dar un astfel de rest ar trebui să fie și o sursă puternică de radiații X, fapt care complică și mai mult explicațiile cu privire la natura fizică a nebuloasei din Carina și a stelelor care sînt scufundate în ea.

Gazul fierbinte, care ar fi cauza radiațiilor difuze observate aici în domeniul X, este pus pe seama vîntului stelar sau pe seama supernovelor. Într-o regiune care conține multe stele de tipul O, rata exploziilor de supernove poate să fie destul de mare. Emisia difuză ar putea să fie radiația termică determinată de supernovele care au explodat cu 10^6-10^7 ani în urmă. Dar, resturi de supernove în regiunile care conțin gaz și praf la mare densitate nu s-au mai observat, iar dacă emisia difuză de radiații X vine de la un singur rest de supernovă, aspectul geometric ar trebui să fie altfel decît cele observate la resturile vechi, cum este Nodul din Cygnus (Cygnus Loop) și Vela X, care sînt surse intense de radiații X difuze. Foarte probabil că resturile de supernove în regiuni aglomerate au aspecte diferite de cele observate deja în regiunile mai puțin dense ale Galaxiei noastre.

În domeniul X, imaginea lui Eta Carinae se aseamănă cu o potcoavă de cal.

În afară de radiațiile X care pot fi asociate cu steaua centrală a nebuloasei din Carina, emisia din acest domeniu mai poate fi interpretată ca radiație termică de la o undă de șoc cauzată de materialul în expansiune, ejectat cu ocazia erupției din anul 1843. Această ipoteză este susținută și de simetria emisiei de radiații X în raport cu centrul nebuloasei. Dar calculele arată că în acest mod s-ar putea explica numai 10^{-7} din energia radiată de Eta Carinae. Această emisie este complet incompatibilă cu interpretarea lui Eta Carinae ca o erupție de supernovă. Datele observaționale furnizează ideea că sursa de energie prezentă în Eta Carinae ar fi un singur

obiect masiv. Sursa de radiaţii X moi pare să coincidă cu centrul nebuloasei şi, prin urmare, poate fi vorba de o stea masivă care se observă în domeniul optic prin norul de praf care o înconjoară, fapt remarcat îndeosebi în domeniul infraroşu.

Prin urmare, ipoteza că erupţia lui Eta Carinae ar fi fost o supernovă nu se menţine. Emisia de radiaţii X de la resturile de supernove arată că masa de gaz fierbinte ejectată trebuie să ducă cu sine mai multă energie decît se observă în cazul lui Eta Carinae.

Observaţiile spectroscopice ale regiunii exterioare ale Nebuloasei din Carina şi mai ales ale *homunculusului*, efectuate cu cîţiva ani în urmă la Cerro Tololo, au pus în evidenţă prezenţa unui nor care ar fi legat de Eta Carinae, acest nor avînd un spectru asemănător cu cel al nebuloaselor gazoase. Prin urmare, aici ar putea fi vorba de un singur corp, o stea cu un fel de coroană stelară masivă. Praful din jur, care radiază atît de puternic în infraroşu, obscurează steaua la lungimile de undă optice, dar este de aşteptat să apară mult mai luminos la lungimi de undă scurte (energii înalte), fapt pentru care obiectul respectiv poate fi considerat cauza emisiei energiei de la domeniul cuprins între 5 şi 10 keV.

Cu ajutorul satelitului IUE s-au obţinut date observaţionale ale norului din jurul lui Eta Carinae în domeniul ultraviolet, observaţii concomitente fiind efectuate şi cu aparate de la sol. Analiza acestor observaţii duce la concluzii nemaicunoscute pînă atunci, printre acestea fiind pusă în evidenţă prezenţa unor linii intense de emisie care provin de la cinci stadii diferite de ionizare ale nitrogenului. În schimb, aici nu s-au găsit carbonul şi oxigenul care, de altfel, sînt caracteristice pentru spectrele nebuloaselor planetare. Probabil că aceste două elemente (C şi O) în condiţiile respective ar fi fost convertite în nitrogen. Dar, ciclul CNO al reacţiilor nucleare care predomină în stelele cele mai masive ar produce transformările respective în apropiere de centrul stelei şi încă nu se poate înţelege cum elementele grele ar fi ajuns în păturile exterioare ale stelei, pentru ca de aici să fie apoi ejectate în spaţiul circumstelar. Cu cîtva timp în urmă, acest fenomen era socotit improbabil. Astăzi însă se cunosc stele foarte masive care sînt omogene. Observaţional există dovezi

că steaua neobişnuită din centrul nebuloasei NGC 6888 a ejectat gaz bogat în nitrogen înainte de a fi realizat supernova al cărui rest este cunoscut sub notaţia Cassiopeia A. Se pare că Eta Carinae susţine ipoteza respectivă.

Gazul ejectat bogat în nitrogen arată că Eta Carinae s-ar găsi mai curînd într-o fază tîrzie a evoluţiei stelare decît una timpurie. Aici trebuie să fi existat suficient timp pentru derularea reacţiilor termonucleare şi apoi pentru ca interiorul stelei să se fi „amestecat" cu părţile periferice. Aşadar, Eta Carinae trebuie să fie mai apropiată de sfîrşitul vieţii sale decît celelalte stele timpurii de tipul O3 asociate cu ea. Astfel, se apreciază că pentru această stea au rămas mai puţin de cîteva sute de mii de ani să „trăiască", durata întregii vieţi fiind de ordinul cîtorva milioane de ani.

În prezent se ştie că Eta Carinae pierde masă într-un ritm mai mare decît alte stele cunoscute ; se pare că ar fi vorba de o rată de circa o masă solară pe fiecare sută de ani. Dar, dacă ea pierde masă în mod constant cu această rată, procesul respectiv nu poate dura mai mult de 10 000 ani. Aşadar, Eta Carinae urmează să-şi încheie viaţa în curînd, vorbind la scala de timp astronomic.

Stelele masive îşi sfîrşesc viaţa printr-o explozie de supernovă, de aceea noi ne putem aştepta ca şi Eta Carinae să explodeze, dar nimeni nu-şi poate închipui cum ar arăta explozia unei stele atît de masive. În alte galaxii poate că au avut loc astfel de explozii, dar depărtarea mare ne-a împiedicat să putem contempla fenomenul în toată splendoarea sa. Pare probabil ca astfel de fenomene să se petreacă în galaxiile din Andromeda şi Triunghiul (M31 şi respectiv M33).

Din consideraţiile prezentate mai sus ajungem la concluzia că problemele cele mai tulburătoare legate de Eta Carinae se pot formula astfel : De ce se manifestă atît de capricios regiunea cu nebuloasa NGC 3372 ? De ce sînt îngrămădite aici stele de sute de mase solare, pe cînd astfel de obiecte sînt foarte rare în alte părţi ale Galaxiei ?

Chiar din cea de-a doua întrebare se desprinde faptul că, în procesul de formare a stelelor, în Univers se pot întîlni obiecte cu mase foarte diferite. Nu toate stelele s-au format după un anumit şablon. Iată de ce putem afirma cu destul

de mare certitudine că, deocamdată, noi sîntem foarte departe de înţelegerea completă a întregului proces de formare a stelelor.

7.2. Steaua enigmatică SS 433

În anul 1977, astronomii americani C. Bruce Stephenson şi Nicholas Sanduleak au publicat o listă cu 455 obiecte cosmice în ale căror spectre se găseau liniile strălucitoare de emisie ale hidrogenului. În general, prezenţa unor astfel de linii este un indiciu al existenţei unei activităţi neobişnuite în (sau lingă) obiectul respectiv. La numărul 433 din lista respectivă (Catalogul lui Stephenson şi Sanduleak) se găseşte o stea roşietică cu magnitudinea aparentă $m_v = 14$ şi coordonatele ecuatoriale $\alpha = 19^h09^m21^s$ şi $\delta = +04°53',9$ (1950), fiind situată în constelaţia Aquila (Vulturul).

În vara anului 1978, David Clark şi Paul Murdin, cu telescopul anglo-american de 3,9 m în diametru, au constatat că, în domeniul optic, SS 433 se prezintă ca o stea căreia îi corespunde o sursă radio compactă, cu intensitatea variabilă. Acest obiect este situat în interiorul unei radiostructuri întinse cunoscută sub denumirea de W50 [Obiectul nr. 50 din catalogul cu surse radio întocmit de Westerlund (RFG)]. În aceeaşi regiune a cerului, satelitul Ariel-5 a descoperit o sursă de radiaţii X care, ulterior, a fost notată A 1909+04. De aici s-a tras concluzia cum că W50 ar fi restul unei explozii de supernovă, cu vîrsta cuprinsă între 10 000 şi 40 000 ani. Aici uimitor este faptul că această radiosursă compactă, deşi rest de supernovă, nu se manifestă ca un pulsar (cum sînt cunoscute manifestările altor resturi de supernove). De aceea s-a presupus că aici ar fi vorba de un fel nou de fosile de supernove, fapt pentru care sursa respectivă a fost numită simplu „radiostea", pentru aceasta fiind întocmite programe speciale în vederea unor noi observaţii.

În anul 1978, pentru observarea stelei SS 433 au fost antrenaţi foarte mulţi cercetători cu cele mai diferite telescoape, de la telescopul de 5 m şi pînă la reflectorul de 60 cm de la Lick. În acest mod s-au colectat numeroase date observaţionale din analiza cărora s-a constatat faptul că SS 433 are un spectru în care predomină liniile puternice de emisie. În plus,

s-a evidenţiat o variabilitate remarcabilă a acestor linii în privinţa lungimilor de undă şi intensităţile corespunzătoare.

În spectrul lui SS 433 au fost identificate liniile din seria Balmer a hidrogenului (H_α, H_β şi H_γ), liniile heliului la lungimile de undă $\lambda = 6678$ şi 5876 Å, precum şi liniile carbonului şi nitrogenului, acestea din urmă fiind semnalmentele optice ale unei surse de radiaţii X.

Dacă facem abstracţie de liniile de absorbţie determinate de mediul interstelar, se ajunge la concluzia că spectrul lui SS 433 este lipsit de astfel de linii. În schimb, pentru fiecare linie de emisie se detectează trei componente (vezi figura 7.2). Componenta principală care apare la poziţia normală, o componentă deplasată spre roşu (spre lungimile de undă mai mari) şi o componentă care, faţă de poziţia normală, este deplasată spre ultraviolet (spre lungimile de undă mai scurte). În plus, s-a constatat că cele două feluri de deplasări, spre roşu şi violet, revin la o anumită poziţie după perioada de 164 zile.

Printre caracteristicile cele mai spectaculoase ale lui SS 433 se remarcă şi prezenţa unor linii de emisie care nu au fost identificate cu linii cunoscute (în laborator), chiar

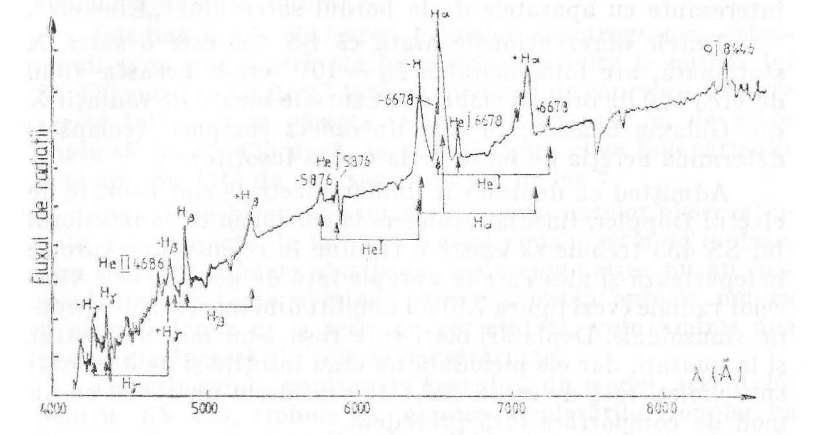


Fig. 7.2. Aspectul global al spectrului sursei SS 433. Se evidenţiază prezenţa celor trei feluri de linii spectrale: cu deplasare spre roşu, cu deplasare spre violet şi linii nedeplasate.

şi numărul acestora fiind variabil, iar lungimile de undă corespunzătoare modificîndu-se de la o noapte la alta.

De îndată ce s-au evidenţiat caracteristicile spectaculoase care au fost detectate prin observaţii spectroscopice, cercetătorii au trecut la examinarea plăcilor fotografice mai vechi, pe care a fost imprimată regiunea în care se găseşte SS 433. Astfel de fotografii au fost efectuate în vederea întreprinderii altor cercetări, clişeele respective fiind păstrate acum în aşa-numitele biblioteci de sticlă de la Observatoarele astronomice. Din examinarea unor astfel de materiale s-a constatat că, în diapazonul optic, SS 433 are variaţii care se repetă după perioadele de 164 şi 13 zile, aplitudinile corespunzătoare fiind 1,5 şi 0,5 magnitudini.

Din analiza liniilor de absorbţie determinate de mediul interstelar s-a ajuns la concluzia că SS 433 se găseşte la distanţa de 3,5 kiloparseci (11 000 ani lumină). La această depărtare, cu magnitudinea aparentă $m_v = 14$, pentru magnitudinea absolută se obţine mărimea $M = -3.5$. Steaua SS 433 a fost urmărită şi în celelate domenii spectrale, variaţiile observate repetîndu-se şi acolo cu perioadele detectate în domeniul optic. În domeniul X s-au obţinut rezultate interesante cu aparatele de la bordul satelitului „Einstein".

Datele observaţionale arată că SS 433 este o sursă X staţionară, are luminozitatea $L_x = 10^{35}$ erg/s, aceasta fiind de vreo 100 de ori mai slabă decît sursele binare de radiaţii X din Galaxia noastră, în care un obiect compact (colapsat) determină acreţia de masă de la o stea însoţitoare.

Admiţînd că deplasările liniilor spectrale sînt cauzate de efectul Doppler, imediat ajungem la concluzia că în interiorul lui SS 433 trebuie să existe o regiune în repaus, una care se îndepărtează şi alta care se apropie faţă de noi. Curbele vitezelor radiale (vezi figura 7.3) au amplitudini mari şi sînt aproape sinusoidale. Deplasări mari spre roşu s-au mai înregistrat şi la quasari, dar ele niciodată nu erau însoţite şi de deplasări spre violet. Iată de ce SS 433 este considerat un obiect cu un mod de comportare fără precedent.

Unele detalii ale liniilor principale (fără deplasare) H_α şi H_β de asemenea suferă modificări care se repetă după o perioadă de 13 zile. La aceste detalii deplasările se produc

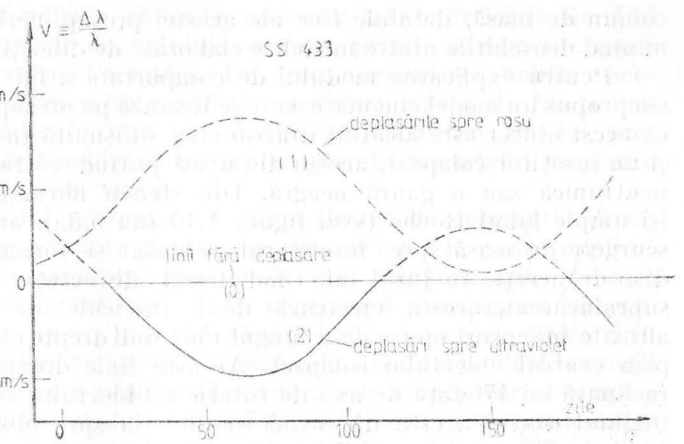


Fig. 7.3. Aspectul curbelor vitezelor radiale la SS 433, obţinute pentru cele trei feluri de linii spectrale : (0) linii fără deplasare; (1) linii cu deplasare spre roşu şi (2) linii cu deplasare spre ultraviolet.

cu viteza de circa 80 km/s, o caracteristică des întîlnită la sistemele de stele duble.

Imediat după obţinerea primelor spectrograme, astronomii şi-au pus o serie de întrebări cu privire la natura lui SS 433 care se manifestă într-un mod atît de capricios. Printre aceste întrebări se găseşte şi următoarea : Ce fel de astru poate să fie SS 433 dacă, în acelaşi timp, el se îndepărtează şi se apropie faţă de noi, sau chiar stă pe loc ?

Încă de la început, pentru explicarea datelor observaţionale recepţionate de la SS 433 s-au emis o serie de ipoteze, s-au elaborat modele, dar problemele enigmatice nu au fost rezolvate. Cu toate acestea, pentru a putea aprecia munca şi efortul depus de o serie de cercetători, vom aminti aici cîteva din încercările cele mai îndrăzneţe.

De la început, menţionăm faptul că un model, acceptabil pentru SS 433, trebuie să explice deplasările Doppler cu vitezele de ordinul zecilor de mii de kilometri pe secundă, cu perioadele de 164 şi 13 zile. Iată de ce modelele propuse vor fi bazate pe ipoteza mişcărilor orbitale în jurul unui centru

comun de masă, detaliile fine ale acestei presupuneri determinînd deosebirile dintre modelele elaborate de diferiţi autori.

Pentru explicarea modului de comportare a lui SS 433 s-a propus un model cinematic care se bazează pe presupunerea că acest obiect este alcătuit dintr-o stea obişnuită (normală) şi un însoţitor colapsat, acesta din urmă putînd să fie o stea neutronică sau o gaură neagră. Din steaua normală, care îşi umple lobul Roche (vezi figura 1.10 sau 5.5a), are loc o scurgere de masă spre însoţitorul colapsat şi formează un disc de acreţie în jurul lui. Cînd discul de acreţie devine supraîncărcat, acesta ejectează două fascicule de radiaţii aliniate în sensuri opuse de-a lungul unei linii drepte care trece prin centrul obiectului colapsat. Această linie dreaptă este înclinată cu 17° faţă de axa de rotaţie a obiectului colapsat, unghiul dintre acesta din urmă şi direcţia spre observator fiind de 78° (vezi figura 7.4).

Dacă sistemul binar presupus are o perioadă orbitală de 13 zile, atunci perioada de 164 zile ar putea fi determinată de fenomenul de precesie a discului de acreţie, un fel de rotaţie proprie în sensul mişcării orbitale.

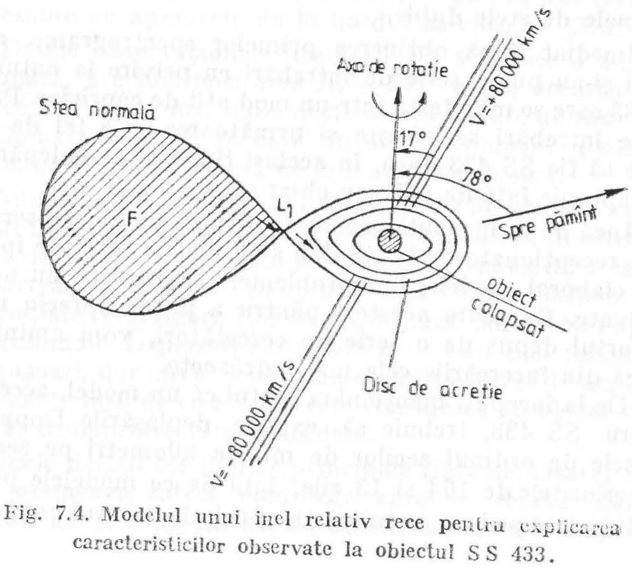


Fig. 7.4. Modelul unui inel relativ rece pentru explicarea caracteristicilor observate la obiectul SS 433.

În condiţiile amintite mai sus, într-o perioadă de 164 zile fasciculele de radiaţii vor avea poziţii diferite în raport cu observatorul terestru. De aceea, deplasarea liniilor spectrale, precum şi intensităţile acestora, depind de fracţiunea de fascicul care intră în cîmpul vizual al observatorului, precum şi de unghiul sub care se găseşte fasciclului respectiv faţă de linia de vizare.

Modelul prezentat aici este destul de schematic şi nu surprinde anumite detalii pe care nici nu le poate explica. Astfel, de exemplu, aici nu se precizează cazurile în care obiectul colapsat este o stea neutronică sau o gaură neagră. Apoi nici nu se încearcă să se explice procesele fizice prin care discul de acreţie determină cele două fascicule de radiaţii etc. De aceea, s-a căutat să se aducă unele modificări şi completări la modelul din figura 7.4. Au apărut astfel mai multe variante dintre care mai amintim cîteva.

La Moscova, astrofizicianul I. S. Şklovski considera că SS 433 este un sistem binar, stelele componente avînd mase mici, de numai două sau trei mase solare. În zilele noastre acest sistem binar ar fi în curs de dezvoltare şi nu peste mult timp va deveni de tipul sursei Hercules X-1. Prin urmare, aici se consideră că obiectul colapsat – steaua neutronică – emite particule relativiste care, lovind în discul de acreţie, determină emisie de radiaţii, iar aspectul variabil al discului respectiv determină variaţiile înregistrate de observatorul terestru.

Într-un alt model se presupune că vitezele mari observate în curenţii de radiaţii ar fi determinate de presiunea cuantelor ultraviolete emise de steaua neutronică.

Cercetătorii din Amsterdam (P. Hut şi E.P.J. van den Heuvel) sînt de părere că pentru SS 433 trebuie elaborat un model cu un sistem binar, în care obiectul colapsat să fie o stea neutronică, dar companionul acestuia să fie o stea Wolf–Rayet cu magnitudinea absolută $M = -4$ şi o masă de circa 10 mase solare.

În cazul cînd obiectul colapsat ar fi o gaură neagră de circa 8 mase solare, companionul ar trebui să fie o stea de tipul spectral O cu o masă de circa 20 de mase solare.

Într-un alt model se presupune că obiectul SS 433 ar fi un sistem de trei stele : un sistem binar strîns care se roteşte

în jurul centrului de masă determinat de masa acestuia și masa unui al treilea corp. În acest tablou se presupune că sistemul binar este alcătuit dintr-o gaură neagră cu masa de vreo 5 mase solare și o stea pitică cu masa de circa 0,4 mase solare. Perioada în sistemul dublu ar fi de numai 3 minute. Acest sistem binar s-ar mișca pe orbita lung periodică cu perioada de 13 zile. Și aici precesia fluxurilor de radiație din sistemul dublu ar determina variațiile detectate de observatorul terestru.

În fine, dacă am continua cu prezentarea modelelor elaborate pentru SS 433, am ajunge la concluzia că există cel puțin atîtea modele cîți cercetători sînt. În plus, datele observaționale mai nou înregistrate scot în evidență noi comportări enigmatice ale acestui obiect capricios. De aceea, cu ocazia unui simpozion UAI consacrat lui SS 433, un cercetător a fost de părere că în prezent astronomii ar trebui să se grăbească și să explice perioadele de 13 și 1^d4 zile, înainte ca datele observaționale să scoată în evidență alte periodicități.

Am amintit aici doar două dintre obiectele enigmatice din Galaxie, dar cu astfel de obiecte s-ar putea întocmi o listă destul de lungă. Astfel de obiecte au fost cunoscute și mai înainte, dar numărul lor a crescut considerabil în urma apariției și dezvoltării astronomiei invizibilului.

ÎN LOC DE ÎNCHEIERE

Din considerațiile prezentate în paginile precedente se desprinde concluzia că astronomia, ca știință bazată pe date observaționale, trebuie să aibă în vedere întregul spectru electromagnetic. Astăzi nu se poate spune că un obiect cosmic este bine cunoscut dacă el a fost observat numai într-un singur domeniu spectral. În favoarea acestei afirmații pot fi citate Nebuloasa Crab și structura Galaxiei noastre, de exemplu. Aici combinarea observațiilor radio și cele optice a condus la rezultate deosebit de interesante. De asemenea, observațiile în infraroșu, cuplate cu cele în radiații X, au contribuit la elaborarea unor modele teoretice care explică destul de bine trăsăturile caracteristice ale unor obiecte cosmice. Iată doar cîteva dintre motivele pentru care astronomii au nevoie de observatoare spațiale cît mai mari, precum și de îmbunătățirea considerabilă a tehnicii observaționale de la sol.

Telescoapele spațiale (*ST* = Space Telescope) sînt chemate să colecteze cît mai multe date observaționale în domeniile inaccesibile pentru telescoapele de la sol. Despre programele unor astfel de realizări am amintit cîte ceva la sfîrșitul capitolelor precedente. Astfel, la sfîrșitul capitolului 3 am subliniat faptul că pentru începutul anilor '90 este prevăzută lansarea unui nou satelit cu receptoare sensibile pentru domeniul infraroșu. Apoi, la sfîrșitul capitolului 6, am amintit proiectele elaborate de Statele Unite ale Americii, Uniunea Sovietică și Franța pentru lansarea unor observatoare spațiale pentru astronomia gama.

Preocupări foarte serioase există și pentru îmbunătățirea condițiilor de observare de la sol. În acest sens se proiectează construirea unor telescoape foarte mari (*VLT* = Very

Large Telescope), care sînt necesare în mod deosebit pentru lucrările de spectroscopie și astronomie în infraroșu. Și aici s-au înregistrat o serie de realizări remarcabile, despre acestea va fi vorba în rîndurile care urmează.

După cum se știe, telescoapele sînt instrumente alcătuite dintr-un ansamblu de oglinzi prin intermediul cărora se pot observa surse luminoase îndepărtate care, altfel, sînt invizibile. De aceea, este necesar ca ele să fie dotate cu oglinzi concave mari sau foarte mari.

Astfel, telescopul Newton de la Observatorul astronomic din Cluj-Napoca (Stația din Feleacu a Centrului de Astronomie și Științe Spațiale) are diametrul oglinzii principale de 50 cm și permite să se observe stelele pînă la magnitudinea aparentă m = 14,5.

Telescopul Hale de pe Muntele Palomar de lingă Los Angeles (California), intrat în funcțiune în anul 1949, are oglinda principală cu diametrul de 5,08 m. Construcția acestuia a fost foarte costisitoare, a durat mult, iar cel de al doilea război mondial a întîrziat lucrările de punere în funcțiune. Numai răcirea oglinzii principale a durat 11 luni, operația respectivă fiind ținută tot timpul sub control. Acest telescop cîntărește 130 t, are o lungime de 14 m, montura de 150 t, totul fiind adăpostit sub o cupolă cu diametrul de 45 m și greutatea de 1 000 t. Cu el se pot observa stele pînă la magnitudinea 23.

În anul 1975, în partea de nord a Munților Caucaz, la Zelenciuk (U.R.S.S.), a intrat în funcțiune telescopul cu oglinda principală de 6 m în diametru. Este instalat la o altitudine de peste 2 000 m și permite observarea stelelor cu magnitudinea limită de 23–24.

Chiar și dintr-o expunere atît de sumară se vede imediat că la construirea telescoapelor uriașe apar o serie de dificultăți tehnice și economice. Iată de ce specialiștii au fost nevoiți să se gîndească la noi procedee de realizare a acestor telescoape care, implicit, să ducă la reducerea prețului lor.

Pentru evitarea neajunsurilor și dificultăților legate de construirea unei oglinzi mari — a unui telescop puternic — au fost emise mai multe idei. Amintim aici două dintre ele.

Prima idee se referă la posibilitatea utilizării mai multor oglinzi de construcție modernă (dintr-o singură bucată) pentru a recepționa radiația trimisă de un corp ceresc, ele fiind astfel dispuse încît fluxurile de lumină reflectată să ajungă la un singur receptor. În acest caz, oglinzile individuale ar reprezenta fiecare cîte un „telescop" cu montură și cupolă proprie, dar ar lucra ca un singur instrument. Ar fi vorba de o baterie de telescoape, aria suprafeței colectoare depinzînd de aria suprafeței oglinzilor componente.

Cea de-a doua propunere constă în construirea unui telescop cu o singură oglindă, aceasta fiind alcătuită din mai multe oglinzi — un mozaic de oglinzi — cu o singură montură și o singură cupolă. În ambele cazuri apar însă probleme legate de reglarea fină a oglinzilor componente și a traiectoriilor optice, fasciculele individuale trebuind să ajungă la un singur receptor. Astfel de reglări fine au devenit posibile și se realizează prin intermediul laserului.

Discuțiile cu privire la construirea unui telescop foarte mare au început cu mulți ani în urmă, ele au fost impulsionate și de experiențele cîștigate cu telescoapele din „generația Palomar" care au fost construite în anii '60 și '70. Observațiile efectuate cu aceste telescoape au scos în evidență o serie de probleme pentru rezolvarea cărora sînt necesare telescoape mult mai puternice.

În anul 1977, la Observatorul European din Sud (*ESO* = European Southern Observatory) s-au desfășurat lucrările unui simpozion cu tema „Telescoapele optice ale viitorului". Din dezbaterile respective, la sfîrșitul acestui simpozion s-a ajuns la concluzia că în viitorul apropiat ar trebui să se lucreze în paralel cu un telescop de 16 m în diametru, patru telescoape de 8 m și 16 telescoape de 4 m.

Ideea realizării unui telescop foarte mare (*VLT* — Very Large Telescope) a pornit, aproape în același timp, de la mai multe grupuri de astronomi. În acest sens menționăm doar faptul că cercetătorii sovietici și cei de la Kitt Peak

(S.U.A.) propuneau realizarea unui telescop de 25 m. Alții erau de părere că ar trebui găsite unele variante în care să se țină seamă de posibilitățile tehnicii actuale și de posibilitățile de finanțare a lucrărilor respective.

În anul 1983, tehnicienii care lucrau în domeniul construcțiilor de telescoape au ajuns la concluzia că cel mai potrivit proiect pentru realizări practice ar fi acela în care se prevedea o oglindă subțire cu diametrul de 8 m. În plus, pentru realizarea unui telescop puternic se prevedea utilizarea unei combinații de mai multe oglinzi de acest fel. S-a ajuns la concluzia că în acest scop s-ar putea utiliza mai multe telescoape de 8 m care să aibă un focar comun. Aceasta cu atît mai mult cu cît în ultimul timp s-a constatat că prin tehnica „speckle" se pot obține imagini ale unor obiecte foarte slabe. Această tehnică a dus la o serie de rezultate remarcabile printre care amintim: furnizarea de imagini separate pentru planeta Pluto și satelitul ei Charon, punerea în evidență a presupusei stele masive R 136 a, precizarea imaginilor stelare ale sistemului dublu T Tauri, evidențierea nucleului galaxiei Seyfert NGC 1068 etc.

În octombrie 1986, la Veneția s-au desfășurat lucrările unui seminar cu tema „Telescopul foarte mare pentru Observatorul European din Sud", iar la începutul anului 1987 s-au analizat posibilitățile de finanțare pentru construirea unui „telescop foarte mare". În fine, la 8 decembrie 1987, Consiliul de conducere al Observatorului ESO a acceptat finanțarea proiectului de execuție a unui telescop de 16 m care să fie alcătuit din patru telescoape de cîte 8 m fiecare. S-a aprobat, așadar, construirea celui mai mare telescop din lume care va reprezenta ochiul Europei spre Univers. Este vorba de un acord la care s-a ajuns după dezbaterile care s-au desfășurat în ultimii 10 ani.

Din anul 1983 au început cercetările pentru căutarea unui loc în care să fie amplasat un telescop foarte mare (VLT). Rezultatele deja existente par să indice o regiune din partea nordică a statului Chile, unde, anual, se înregistrează un număr mare de nopți senine cu un conținut redus de vapori de apă în atmosferă. Se pare că locul cu astfel de condiții s-ar găsi lîngă Cerro Paranal.

Cu privire la desfășurarea în timp a realizării telescopului de 16 metri, autorii respectivi au prevăzut ca primul telescop de 8 m să intre în funcțiune în jurul anului 1994, în timp ce toate cele patru telescoape componente vor fi terminate și cuplate la focarul comun abia prin anul 2000.

Desigur, între timp se discută și alte proiecte pentru construirea unor telescoape foarte mari. Astfel, R.F.G. și Italia intenționează fiecare să realizeze cîte un telescop care să fie alcătuit din cîte două telescoape de 8 m.

Cercetătorii de la Universitatea din California și Institutul de Tehnologie din California au în proiectare un telescop de 10 m, care este așteptat să intre în funcțiune la începutul anilor '90.

Pentru un viitor mai îndepărtat se are în vedere construirea unor telescoape de 10 și 30 m. În acest mod se speră să se poată înregistra obiecte cu magnitudinea aparentă $m = 30$, iar spectroscopia să ajungă pînă la $m = 27$, cu o putere de rezoluție de 0,025 secunde de arc.

Rezultatele uimitoare furnizate de radioastronomie în ultimii 40 de ani au scos în evidență importanța lucrărilor de interferometrie și posibilitățile de aplicabilitate în astronomia optică. În prezent există peste 1 000 de referiri bibliografice la „Imaginea interferometrică în astronomia optică". Rezultatele existente arată că tehnica zilelor noastre poate asigura o combinație de telescoape cu un focar comun, iar problemele care urmează a fi abordate sînt nenumărate. Amintim aici cîteva dintre ele: obiecte violent variabile cum sînt supernovele, quasari cu variații rapide în luminozitate, nuclee galactice active, stele cu erupții etc. Se întrevăd noi posibilități pentru cercetarea condițiilor în care se desfășoară procesul de formare a stelelor și se așteaptă să devină posibilă observarea unor detalii ale galaxiilor îndepărtate și ale altor obiecte cosmice cu mari deplasări spre roșu.

Pentru cercetarea formării stelelor și a obiectelor asemănătoare cu cele din sistemul solar se cere ca telescopul foarte mare sau interferometrul optic să fie sensibil pentru lumină infraroșie. În schimb, pentru cercetarea absorbției luminii prin mediul intergalactic, observarea variabilității

strălucirii quasarilor, precizarea compoziției chimice a stelelor din alte galaxii etc. sînt necesare observații în domeniile X și gama, detectoarele respective trebuind să fie de vreo 20 de ori mai sensibile decît cele existente în prezent. Iată de ce, lucrările de interferometrie optică efectuate cu telescoape spațiale sînt așteptate să lămurească o serie de probleme legate de formațiunile structurale ale suprafețelor stelare sau a detaliilor care înconjură nucleele active ale unor galaxii îndepărtate.

Ammuel, P. R., *Nebo v rentgenovski luciah*, Moskva, 1984.
Culhane, L., Sanford, W.P., *X-Ray Astronomy*. London, 1981.
Dumitrescu, Al., *Surse X galactice compacte*. În „Anuarul Astronomic" pe anul 1986, p. 317, CASS, Editura Academiei R.S.R., 1985.
Hoyle, F., *Frontierele astronomiei*. Editura Științifică, București, 1971.
Pacholczyk, A.G., *Radiogalaxies*. Pergamon Press, 1971.
Peebles, J.E., *The Large-Scale Structures of the Universe*, Princeton University Press,
Siuniaeva, P.A., *Astrofizica i cosmiceskaia fizica*. Nauka, Moskva, 1982.
Todoran, I., *Explozii in Univers* (Stele variabile, nove și supernove). Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1979.
Țifrea, E., Dumitrescu, Al., Mariș, G., *Universul în radiație X*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1987.
Ureche, V., *Universul* (Astrofizica). Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1987.
* * * Annual Review of Astronomy and Astrophysics, volumele 15 și și 16, Editor : G. Burbidge, Paulo Alto, S.U.A., 1977, 1978.
* * * *Galactic X-Ray Sources*, Editori : Sanford, P.W., Laskarides, P., Salten, J., New York, 1982.
* * * *Infrared Astronomy*, Editori : Wynn, Williams, C.G., Cruikshank, D.O., in IAU Symposium nr. 96, Held in Kona, Hawaii, June 23—27, 1980,
* * * *The Physics of Accretion onto Compact Objects*, Editori : Mason, K.O., Watson, M.G., and White, N.E., in : Lectures Notes in Physics, 266, 1986.

Prefață 5

Capitolul 1
BOLTA CEREASCĂ — APARENȚĂ ȘI REALITATE 7
1.1. Strălucirea și luminozitatea stelelor 7
1.2. Noțiuni de analiză spectrală 10
1.3. Temperaturi stelare 12
1.4. Diagrama Hertzsprung-Russell 18
1.5. Serii de linii spectrale 20
1.6. Elemente de teoria radiației 25
1.7. Structura heliocentrică a sistemului solar 30
1.8. Sistemul nostru stelar — Galaxia 31
1.9. Elemente de astronomie extragalactică 39

Capitolul 2
APARIȚIA ȘI DEZVOLTAREA RADIOASTRONOMIEI 45
2.1. Primele observații astronomice in domeniul undelor radio . . 46
2.2. Fondul cerului observat pe lungimile de undă radio 51
2.3. Observarea Soarelui în domeniul undelor radio 52
2.4. Radioastronomia lunară 55
2.5. Radiațiile radio ale planetelor din sistemul solar 56
2.6. Surse de radiații radio in Galaxie 58
2.7. Radioastronomia extragalactică 72

Capitolul 3
ASTRONOMIA ÎN INFRAROȘU 86
3.1. Absorbția luminii infraroșii prin atmosfera terestră 86
3.2. Realizări tehnice în astronomia în infraroșu 89
3.3. Cercetarea sistemului solar în diapazonul infraroșu 93
3.4. Stele infraroșii 99

3.5. Nebuloase galactice · · · 104
3.6. Structura Galaxiei în diapazonul infraroșu · · · 113
3.7. Astronomia extragalactică în infraroșu · · · 115
3.8. Radiația de fond în infraroșu · · · 122

Capitolul 4

ASTRONOMIA ÎN ULTRAVIOLET · · · 124
4.1. Aspectul bolții cerești în ultraviolet · · · 125
4.2. Observarea sistemului solar în ultraviolet · · · 126
4.3. Observarea stelelor în ultraviolet · · · 128
4.4. Observarea nebuloaselor și a mediului interstelar în ultraviolet · · · 135
4.5. Astronomia extragalactică în ultraviolet · · · 137

Capitolul 5

ASTRONOMIA ÎN DOMENIUL X · · · 142
5.1. Probleme tehnice cu privire la apariția și dezvoltarea astronomiei în domeniul X · · · 142
5.2. Soarele „văzut" în domeniul X · · · 148
5.3. Observarea stelelor normale și a stelelor variabile în domeniul X · · · 150
5.4. Stele Roentgen · · · 153
5.5. Resturi de supernove observate în domeniul X · · · 161
5.6. Pulsari Roentgen—Pulsari X. · · · 167
5.7. Bursteri de radiații X. Noi surse Roentgen · · · 173
5.8. Surse X asemănătoare novelor. Surse Roentgen temporare 177
5.9. Surse X în roiuri stelare globulare · · · 181
5.10. Observarea nebuloaselor galactice în domeniul X · · · 183
5.11. Surse X extragalactice · · · 184

Capitolul 6

DETECTAREA ENERGIILOR ÎNALTE. ASTRONOMIA GAMA 195
6.1. Radiația gama de origine solară · · · 197
6.2. Surse de radiații gama galactice · · · 198
6.3. Astronomia extragalactică în radiații gama · · · 212
6.4. Modele de mecanisme pentru emisia radiațiilor gama · · · 213

Capitolul 7

DIN ENIGMELE GALAXIEI · · · 226
7.1. Eta Carinae · · · 227
7.2. Steaua enigmatică SS 433 · · · 236
În loc de încheiere · · · 243
Bibliografie selectivă · · · 249